

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a realizace plošné antény pro čidlo technologie
LoraWAN 868 MHz**

**Design and Realisation of Patch Antenna for LoraWan Node
at 868 MHz**

2019

Lukáš Broda

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Broda

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a realizace plošné antény pro čidlo technologie LoraWAN 868 MHz

Design and Realisation of Patch Antenna for LoraWan Node at 868 MHz

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Využití pásma 868 MHz v souvislosti s rozvojem nových technologií internetu věcí značně roste. Pro kvalitní přenos signálu je důležité vybavit vysílací stranu (senzor) anténou. Práce si klade za cíl popis, návrh a výrobu plošné antény pracující na kmitočtu 868 MHz vhodnou pro implementaci do senzoru sítě IoT.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište různé varianty antén, které lze použít na straně koncového bodu sítě(senzoru).
2. Proveďte návrh a simulaci antény v simulačním programu CST Studio.
3. Realizujte praktický model antény na kmitočtu 868 MHz.
4. Proveďte správnost návrhu a konstrukce měření. Výsledky měření vyhodnoťte.

Seznam doporučené odborné literatury:

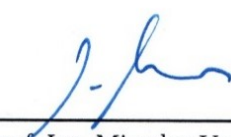
[1] BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

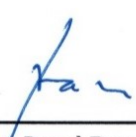
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019


prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 29. apríla 2019 *Broda Lukáš*

podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Marekovi Dvorskému, Ph.D. za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Bakalárska práca sa venuje problematike návrhu a samotnej realizácie plošnej antény, ktorá primárne dokáže spolupracovať s technológiou LoRaWAN, čiže inými slovami, dokáže pracovať vo frekvenčnom bezlicenčnom ISM pásme 868 MHz (863–870 MHz). Cieľom tejto práce je popísať rôzne varianty antén, ktoré je možné použiť na strane senzoru, prakticky navrhnuť a zrealizovať plošnú anténu, určenú pre túto technológiu. Anténa musí byť schopná fungovať na požadovanej frekvencii a byť použiteľná aj v praxi. Správnosť návrhu a teda aj následné overenie funkčnosti antény dosiahneme meraním a následným vyhodnotením merania. Výsledkom tejto práce je funkčná plošná anténa, ktorú je možné použiť na strane senzoru hlavne v rámci technológie LoRaWAN, ale aj všeobecne v ISM pásme 868 MHz.

Kľúčové slová

antény; internet vecí; IoT; LoRaWAN; metódy napájania; mikropásiková anténa; mikropásikové napájanie; napájanie sondou; návrh antény; plošná anténa;

Abstract

Bachelor thesis deals with the question of the design and implementation of the patch antenna itself, which is able to cooperate mainly with LoRaWAN technology, in other words antenna is able to operate in ISM frequency band 868 MHz (863–870 MHz). The point of this work is to describe various antenna variants which can be used on the sensor side, practically design and realize a patch antenna designed for this technology. The antenna must be able to operate at the desired frequency and must be applicable in practice. The correctness of the design and the subsequent verification of the antenna's functionality is achieved by measurement and subsequent evaluation of the measurement. The result of this work is functional patch antenna, which can be used on sensor side mainly within LoRaWAN technology, but also in general in ISM frequency band 868 MHz.

Key words

antennas; coaxial probe feeding; design of antenna; feeding methods; Internet of Things; IoT; LoRaWAN; microstrip antenna; microstrip feeding; patch antenna;

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
ϵ_r	[-]	Relatívna permitivita
ϵ_{eff}	[-]	Efektívna permitivita
ρ	[dB]	Koeficient odrazu
η	[%]	Účinnosť antény
λ	[m]	Vlnová dĺžka
λ_0	[m]	Vlnová dĺžka priestoru
A	[m ²]	Apertúra antény
D	[dBi]	Smerovosť antény
G	[dBi]	Zisk antény
h	[m]	Hrúbka substrátu
I_{vst}	[A]	Vstupný prúd
L	[m]	Dĺžka mikropásiku
RL	[dB]	Útlm odrazu
R_{vst}	[Ω]	Odpor žiarenia antény
R_{ztr}	[Ω]	Stratový odpor
S_{11}	[dB]	Parameter S_{11}
t	[m]	Hrúbka mikropásiku
U_{vst}	[V]	Vstupné napätie
v_0	[m/s]	Rýchlosť svetla
W	[m]	Šírka mikropásiku
X_{vst}	[Ω]	Vstupná reaktancia
Z	[Ω]	Impedancia

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
AMPS	Advanced Mobile Phone System
dB	Decibel
dBd	Decibel over dipole
dB	Decibel isotropic
F	Farad
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FME	For Mobile Equipment
GSM	Global System for Mobile Communications
H	Henry
Hz	Jednotka frekvencie
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, scientific and medical
LoRaWan	Long Range Wide Area Network
MHz	Milión hertzov
nH	Nano Henry
PCD	Personal Communications Devices
PCS	Personal Communications Service
pF	Piko Farad
PSV	Pomer stojatých vln
SMA	SubMiniature version A
VSWR	Voltage standing wave ratio

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Antény.....	- 15 -
1.1 Všeobecný popis antén.....	- 15 -
1.2 Základné vlastnosti antén.....	- 16 -
1.2.1 Zisk antény.....	- 16 -
1.2.2 Účinnosť antény.....	- 17 -
1.2.3 Smerovosť antény.....	- 17 -
1.2.4 Vyžarovací uhol antény.....	- 17 -
1.2.5 Šírka prenášaného pásma.....	- 18 -
1.2.6 Polarizácia.....	- 19 -
1.2.7 Vstupná impedancia.....	- 19 -
1.2.8 S11 parameter.....	- 20 -
1.2.9 Pomer stojatých vln.....	- 20 -
2 Plošné antény.....	- 22 -
2.1 Konštrukcia antény.....	- 23 -
2.2 Napájanie.....	- 24 -
2.2.1 Napájanie mikropásikovým vedením.....	- 24 -
2.2.2 Napájanie koaxiálnou sondou.....	- 25 -
2.2.3 Napájanie viazané apertúrou.....	- 26 -
2.2.4 Budenie blízkym poľom.....	- 26 -
2.3 Metódy analýzy plošných antén.....	- 28 -
3 Súčasné varianty antén, pracujúce v pásme 868 MHz.....	- 31 -
3.1 Frekvenčné pásmo 868 MHz a LoRaWAN.....	- 31 -
3.2 Antény na trhu.....	- 32 -
4 Návrh, simulácia a optimalizácia antény.....	- 43 -
4.1 O programe CST Studio.....	- 43 -
4.2 Návrh antény.....	- 43 -
4.2.1 Skutočné vlastnosti antény.....	- 43 -
4.2.2 Výber substrátu.....	- 44 -

4.2.3	Napájanie antény	45 -
4.3	Simulácia antény	45 -
4.4	Optimalizácia antény	47 -
4.4.1	Model č. 1	47 -
4.4.2	Model č. 2	51 -
4.4.3	Simulácia na substráte ASTRA MT77	54 -
5	Praktická realizácia antény	55 -
5.1	Výroba antény	55 -
5.2	Overenie správnosti výroby meraním a následná optimalizácia	57 -
5.3	Výsledky merania	57 -
6	Záver	62 -
7	Použitá literatúra	63 -
8	Zoznam príloh	65 -

Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek

Číslo	Názov ilustrácie	Číslo strany
1.1	Grafické znázornenie zisku antény	16
1.2	Grafické znázornenie smerovosti antén	17
1.3	Grafické znázornenie vyžarovacieho uhlu	18
1.4	Grafické znázornenie šírky pásma	18
1.5	Grafické znázornenie polarizácie	19
1.6	Grafické znázornenie PSV	21
2.1	Bežné tvary plošných antén	22
2.2	Plošná anténa – pohľad z vrchu	23
2.3	Plošná anténa – pohľad z boku	24
2.4	Spôsoby napájania	25
2.5	Ekvivalentné obvody napájania	26
2.6	Napájanie viazané apertúrou	27
2.7	Budenie blízkym poľom	27
2.8	Ekvivalentné obvody napájania	27
2.9	Siločiary el. Poľa	28
2.10	Efektívna konštanta v závislosti na frekvencii	29
2.11	Dĺžka antény – pohľad z vrchu	30
2.12	Dĺžka antény – pohľad z boku	30
3.1	Architektúra siete LoRa	32
3.2	Anténa 2J300M	33
3.3	Závislosť VSWR na frekvencii antény 2J300M	33
3.4	Anténa 2JP0104P	34
3.5	Prekreslený tvar antény 2JP0104P	34
3.6	Závislosť VSWR na frekvencii antény 2JP0104P	34
3.7	Závislosť zisku na frekvencii antény 2JP0104P	35
3.8	Závislosť VSWR na frekvencii antény ANT-868-SP	35
3.9	Anténa 2JP0115P	36

3.10	Závislosť VSWR na frekvencii antény 2JP0115P	36
3.11	Závislosť zisku na frekvencii antény 2JP0115P	37
3.12	Prekreslený tvar antény 2JP0115P	37
3.13	Anténa PL-6115B-868	38
3.14	Hodnota VSWR pre frekvenciu 868 MHz	39
3.15	Závislosť účinnosti PL-6115B-868 na frekvencii	39
3.16	Hodnota VSWR antény 2JE05 pre pásmo 868 MHz	40
3.17	Hodnota VSWR v závislosti na frekvencii ILA.02	41
3.18	Hodnota účinnosti ILA.02 v závislosti na frekvencii	41
3.19	Hodnota zisku v závislosti na frekvencii ILA.02	42
4.1	Namerané hodnoty S_{11} pôvodnej antény	44
4.2	Rozmery neoptimalizovanej antény	46
4.3	Nasimulovaná hodnota S_{11} neoptimalizovanej antény	46
	Nasimulovaná hodnota VSWR neoptimalizovanej antény	
4.4		46
	Zmena hodnoty S_{11} v závislosti na zmene rozmerov	
4.5	(model č. 1)	48
4.6	Hodnota S_{11} po dokončení optimalizácie (model č. 1)	48
4.7	Hodnota VSWR po dokončení optimalizácie (model č. 1)	49
4.8	Rozmery optimalizovanej antény (model č. 1)	49
4.9	3D vyžarovací diagram (model č. 1)	50
4.10	Smerová charakteristika a) vertikálna, b) horizontálna (model č. 1)	50
4.11	Zmena hodnoty S_{11} v závislosti na zmene rozmerov (model č. 2)	51
4.12	Hodnota S_{11} po dokončení optimalizácie (model č. 2)	51
4.13	Hodnota VSWR po dokončení optimalizácie (model č. 2)	52

4.14	Rozmery optimalizovanej antény (model č. 2)	52
4.15	3D vyžarovací diagram (model č. 2)	53
4.16	Smerová charakteristika a) horizontálna, b) vertikálna	53
5.1	Stav antény pred opracovaním	55
5.2	Stav všetkých antén po opracovaní	56
5.3	Napájkovaný pigtail s konektorom SMA	56
5.4	Výsledky merania parametra S_{11} – model 1a, 1b	58
5.5	Výsledky merania PSV – model 1a, 1b	59
5.6	Výsledky merania parametra S_{11} – model 2a, 2b	59
5.7	Výsledky merania PSV – model 2a, 2b	60

Číslo	Názov tabuľky	Číslo strany
5.1	Namerané hodnoty S_{11} a PSV jednotlivých modelov antén	57
5.2	Namerané hodnoty zisku pre jednotlivé modely antény	61

Úvod

V súčasnej dobe sa veľmi rýchlym tempom posúvajú dopredu technológie, ktoré blízko súvisia s internetom vecí. Podstata tejto technológie je zabezpečiť komunikáciu medzi rôznymi druhmi zariadení, ich pripojenie k internetu a ich ovládanie. Je dôležité, aby zariadenia dokázali komunikovať najmä bezdrôtovo. Aby bol zabezpečený dostatočne spoľahlivý spôsob prenosu informácií, s čím súvisí aj kvalitný prenos signálu, musí byť vysielacia, ale aj prijímacia strana vybavená určitým typom antény. Tieto typy antén musia byť schopné vysielat', ale aj prijímať potrebný signál. Vo veľkej miere sa v tejto oblasti využíva pásmo bezlicenčné ISM pásmo 868 MHz s čím súvisí aj potreba výroby antén, ktoré sú navrhnuté primárne na túto konkrétnu frekvenciu. Táto technológia si žiada, aby antény boli veľmi malé a relatívne lacné na výrobu. Do tejto kategórie spadajú aj plošné typy antén. Medzi najväčšie klady týchto antén patrí ich nízka cena, nízka hmotnosť, malé rozmery, jednoduchosť výroby a taktiež možnosť realizovať anténu v rôznych tvaroch. Plošné antény nachádzajú využitie v rôznych oblastiach, ako napríklad v leteckom priemysle, vo vojenskom odvetí, ale aj v rôznych satelitoch. Naopak, tento typ, ako aj každý iný, má aj svoje nevýhody, ktoré sú napríklad ich relatívne malá účinnosť a malý zisk antény.

V tejto práci sa budem venovať práve problematike návrhu, realizácie a overenia správnosti návrhu meraním plošnej antény, ktorá využíva pásmo 868 MHz, inými slovami dokáže teda spolupracovať s technológiou LoRaWan. V prvej časti tejto práce sa budem venovať problematike antén v teoretickej rovine, kde popíšem základné vlastnosti antén a budem sa bližšie venovať plošným anténam, ako ich konštrukcii, napájaniu, alebo spôsobu ich analýzy. Ďalej popíšem rôzne druhy antén, ktoré sú momentálne na trhu a pracujú na spomínanom frekvenčnom pásme, budem sa venovať ich popisu a porovnaní medzi sebou. Následne nastane realizácia antény. Realizácia je rozdelená do viacerých krokov, kde najskôr prebehne návrh a simulácia antény v simulačnom programe CST Studio. Nasleduje praktická realizácia plošnej antény a následne overenie jej parametrov a správnosti návrhu meraním.

1 Antény

1.1 Všeobecný popis antén

Vo všeobecnosti môžeme anténu v jednoduchosti definovať ako zariadenie, ktoré slúži na príjem a vysielanie rádiových elektromagnetických vln. Anténe dodáva energiu zdroj vo forme elektrického prúdu, ktorý je privedený na vstupné svorky antény a následne, tento elektrický prúd je anténou vyžiarený vo forme elektromagnetickej vlny do priestoru. V prípade, že anténa slúži ako prijímač je proces opačný. Zariadenie zachytí vysielanú elektromagnetickú vlnu, na svorkách antény vznikne elektrický prúd, ktorý je privedený na prijímač, kde je následne zosilnený. Elektromagnetické vlny, avšak vyžaruje každý vodič, ktorým prechádza striedavý elektrický prúd. Vo všeobecnosti je teda anténa vodič, ktorý je upravený takým spôsobom, aby vyžaroval elektromagnetické vlny v čo najväčšom množstve. Antény sú neodmysliteľnou súčasťou všetkých rádiových zariadení. Používajú sa pri rozhlasovom vysielaní, televíznom vysielaní, na obojsmernú rádiovú komunikáciu, môžeme ich nájsť v mobilných telefónoch, satelitoch a vo veľa iných zariadeniach. [1]

Antény môžu byť navrhnuté rôznymi spôsobmi na rôzne účely a to tak, aby vysielali a prijímali rádiové vlny, vo všetkých smeroch, vtedy hovoríme o všesmerovej anténe, alebo aby vysielali a prijímali len v určitom smere, vtedy hovoríme o smerovej anténe. Prvá anténa v histórii bola skonštruovaná nemeckým fyzikom Heinrichom Hertzom, ako pokus o preukázanie existencie elektromagnetických vln. Táto prvá anténa sa nazýva dipól. V súčasnej dobe existuje veľmi veľké množstvo rôznych typov antén. Medzi najznámejšie patria napríklad plošné antény, dipólové antény, sektorové antény, antény typu Yagi, alebo napríklad parabolické antény. [2]

Ako už bolo spomenuté, antény je možno navrhnuť na rôzne účely. Tieto antény sa potom odlišujú nielen svojím tvarom, konštrukciou, ale aj svojimi vlastnosťami. Tieto základné vlastnosti budú stručne zhrnuté v nasledujúcich riadkoch. Spomínané vlastnosti popisujúce anténu teda sú:

- Zisk antény
- Účinnosť antény
- Smerovosť antény
- Vyžarovací uhol
- Šírka prenášaného pásma
- Polarizácia
- Vstupná impedancia
- S_{11} parameter
- PSV

1.2 Základné vlastnosti antén

1.2.1 Zisk antény

Zisk antény je jedna z najdôležitejších vlastností, ktoré anténa ponúka. Zisk udáva, koľkokrát väčší prijímací výkon anténa poskytuje v porovnaní s pol-vlnným dipólom, alebo s dokonale všesmerovou anténou (izotropný žiarič).

Zisk antény v porovnaní s izotropnou anténou sa udáva v dBi (Decibel isotropic), zisk v porovnaní s dipólom zase dBd (Decibel over dipole). Zisk antény je teda definovaný vzťahom:

$$G = 10 \log D \text{ [dBi]} \quad (1.1)$$

kde G označuje zisk antény,

D označuje činiteľ smerovosti. [3]

Smerovosť D zo vzťahu (1.1) dostaneme ako:

$$D = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \text{ [dBi]} \quad (1.2)$$

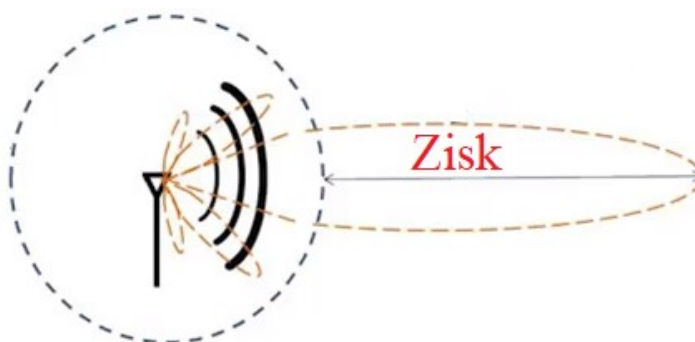
kde D je smerovosť antény,

A označuje plochu apertúry antény,

a λ je vlnová dĺžka. [3]

Prevod medzi jednotkami dBi a dBd je potom nasledovný :

$$G \text{ [dBi]} = 2,15 + G \text{ [dBd]} \quad (1.3)$$



Obrázok 1.1: Grafické znázornenie zisku antény

1.2.2 Účinnosť antény

Účinnosť antény udáva pomer medzi množstvom vyžiarenej energie a množstvom energie, ktorá je do antény dodaná. Tento pomer je najčastejšie vyjadrený v percentách. Účinnosť je definovaná vzťahom:

$$\eta = \frac{R_{vst}}{R_{vst} + R_{ztr}} \quad (1.4)$$

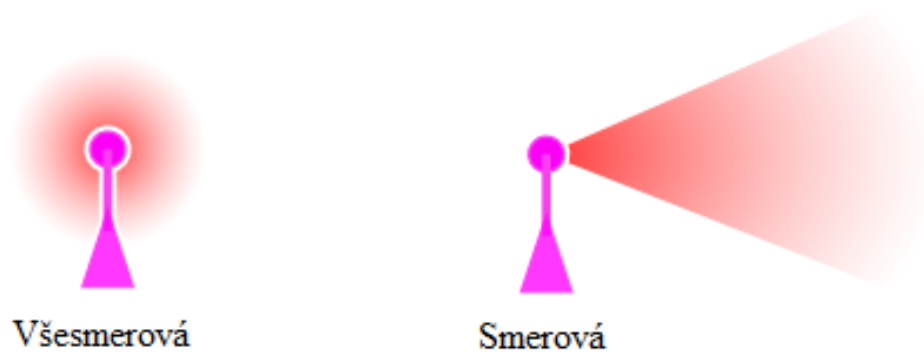
kde R_{vst} vyjadruje odpor žiarenia,

η označuje účinnosť antény,

R_{ztr} vyjadruje stratový odpor antény. [4]

1.2.3 Smerovosť antény

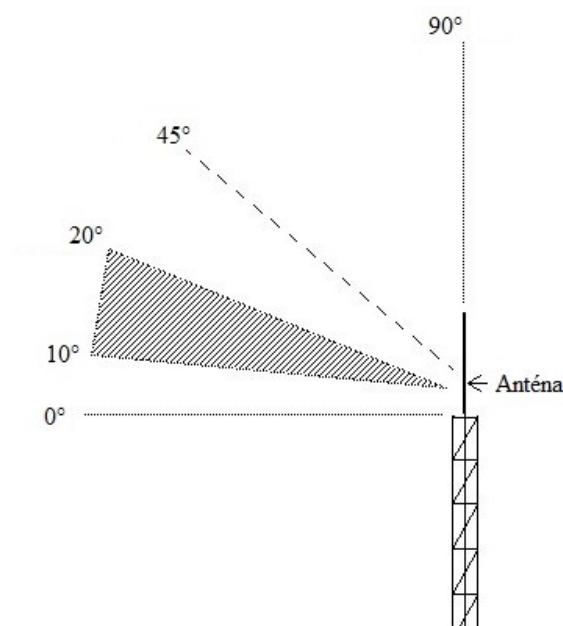
Smerovosť antény je schopnosť vyžarovať a prijímať elektromagnetické vlny s rôznou intenzitou v nami požadovanom smere. Keď sa hovorí o smerovosti nemožno nespomenúť všesmerovú anténu. Táto anténa rovnomerne vyžaruje do celého sférického priestoru, zároveň slúži ako referenčná anténa, avšak je len hypotetická, čiže nereálna. Číselné vyjadrenie tejto vlastnosti možno získať zo vzťahu (1.2). [5]



Obrázok 1.2: Grafické znázornenie smerovosti antén

1.2.4 Vyžarovací uhol antény

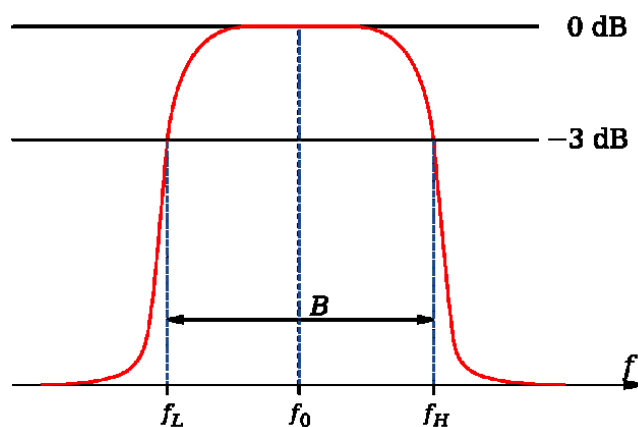
Vyžarovací uhol antény je uhol daný smerovým diagramom a je definovaný ako rozdiel uhlov bodov, kde dochádza k poklesu signálu o 3 dB. [6]



Obrázok 1.3: Grafické znázornenie vyžarovacieho uhlu antény [6]

1.2.5 Šírka prenášaného pásma

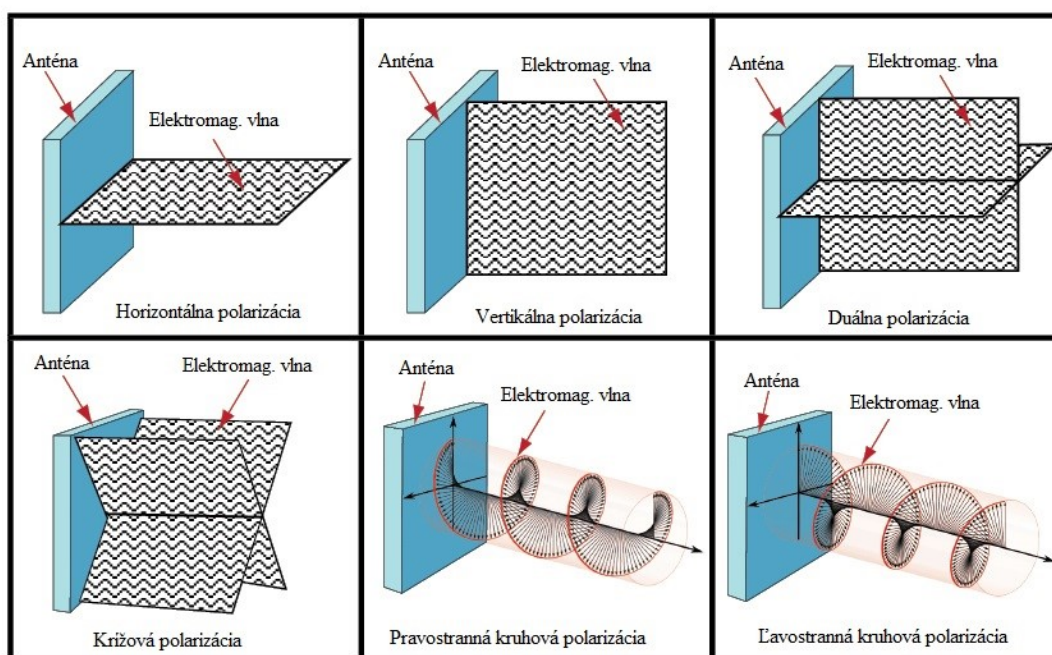
Šírka prenášaného pásma nám určuje šírku frekvenčného pásma, v ktorom anténa funguje, respektíve na ktoré je primárne navrhnutá. Táto vlastnosť sa udáva v hertzoch [Hz]. Existuje viacero typov antén, niektoré z nich sú širokopásmové, čo znamená, že dokážu pracovať v určitom širokom frekvenčnom rozmedzí, niekedy až v radoch desiatok ba až stoviek MHz, alebo antény, ktoré sú navrhnuté, len na určitú frekvenciu. Šírka prenášaného pásma veľmi závisí od konkrétnej antény, kde sa táto šírka môže pohybovať len v rámci jednotiek MHz, ale aj stovkách MHz. [7]



Obrázok 1.4: Grafické znázornenie šírky prenášaného pásma [7]

1.2.6 Polarizácia

Polarizácia udáva rovinu, v ktorej kmitá elektromagnetická zložka žiarenia. Polarizácia závisí od použitia typu vysielania. Pri pozemnom vysielaní sa zvyčajne využíva lineárna polarizácia, naopak pri satelitnom sa využíva kruhová, prípadne eliptická. Polarizácia je dôležitý faktor pri výbere vhodnej antény, pretože napr. vertikálne polarizovaný signál môže byť prijímaný len vertikálnou anténou, horizontálne polarizovaný – horizontálnou anténou, pri eliptickej polarizácii nezáleží na použitej anténe. V prípade nezhody polarizácie vysielacej a prijímacej strany dochádza k veľkému útlmu a nastáva tzv. polarizačné neprispôsobenie. [8]



Obrázok 1.5: Grafické znázornenie polarizácie antén [8]

1.2.7 Vstupná impedancia

Ďalšia vlastnosť, vstupná impedancia, označovaná ako " Z ". Vstupná impedancia je impedancia, ktorú je možno namerať na vstupných svorkách antény a je teda daná pomerom napätia a prúdu na vstupe antény. Impedancia je zložená z dvoch zložiek a to z reálnej časti a časti imaginárnej. Reálna zložka je obvykle označovaná ako " R " a v jednoduchosti sa dá definovať ako tá časť impedancie, ktorá vykonáva prácu. Druhá časť, teda časť imaginárna je označovaná ako " X ". Imaginárna časť môže byť dvojakého charakteru. V prípade, že je hodnota tejto časti kladná, hovoríme o induktívnom charaktere imaginárnej časti, v opačnom prípade ide o kapacitný charakter. Tento kapacitný charakter spôsobuje oneskorenie napätia za prúdom, v prípade induktívneho charakteru je to naopak a síce, oneskorenie prúdu za napätím. Veľkosť impedancie antény musí byť aspoň približne rovnaká, ako impedancia napájacieho kábla z dôvodu, aby

nedochádzalo k vzniku odrazených vĺn, čo je stav veľmi nežiadúci. V prípade, že impedancie nie sú rovnaké, musíme navrhnúť impedančné prispôsobenie antény. [2]

$$Z = \frac{U_{vst}}{I_{vst}} = R_{vst} + jX_{vst} [\Omega] \quad (1.5)$$

1.2.8 S_{11} parameter

Tento parameter vyjadruje vstupný činiteľ odrazu, ktorý je uvádzaný vo forme útlmu odrazu v jednotkách dB. V ideálnom prípade by všetka energia bola prenesená do antény a buď vyžiarená, alebo spotrebovaná na straty. Ideálna hodnota parametru S_{11} by mala nadobúdať čo najväčšie záporné hodnoty. Pri plošných anténach, prijateľná hodnota S_{11} je menšia ako -10 dB. Vzťah pre výpočet parametru je:

$$S_{11} = 20 \log \rho [\text{dB}][9] \quad (1.6)$$

kde ρ označuje koeficient odrazu.

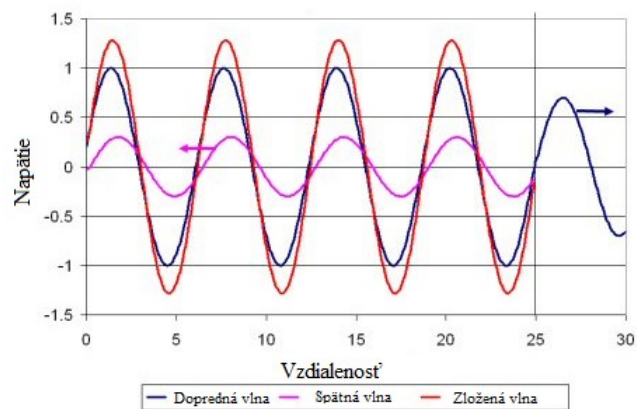
1.2.9 Pomer stojatých vĺn

Skratka PSV, odvodená zo slovného spojenia pomer stojatých vĺn, alebo aj SWR (standing wave ratio) vyjadruje pomer dvoch veličín a preto je udávaná v tvare X:1, kde X môže nadobúdať ľubovoľnú hodnotu, ktorá je v rozmedzí 1 až nekonečno. V jednoduchosti možno zhrnúť, že PSV vyjadruje pomer výkonu elektromagnetickej vlny, ktorá sa šíri vedením v doprednom smere (od zdroja k anténe) a elektromagnetickej vlny, ktorá sa odrazí od neprispôsobenia medzi impedanciou vedenia a samotnej antény. Inými slovami, je to teda pomer medzi výkonom vlny, ktorá pokračuje ďalej (v tomto prípade do samotnej antény) a výkonom vlny, ktorá sa odrazí. Vďaka tomu, že dopredná i odrazená vlna majú rovnakú frekvenciu, ale iný výkon vzniká tzv. stojaté vlnenie. So skratkou PSV priamo súvisí aj veľmi často spomínaný útlm odrazu. Útlm odrazu, ale nie je nič iné, len logaritmicke vyjadrený pomer výkonu odrazenej a doprednej elektromagnetickej vlny. Útlm odrazu preto možno vyjadriť ako:

$$RL = 20 * \log \left(\frac{PSV+1}{PSV-1} \right) [\text{dB}] \quad (1.7)$$

kde RL označuje útlm odrazu.

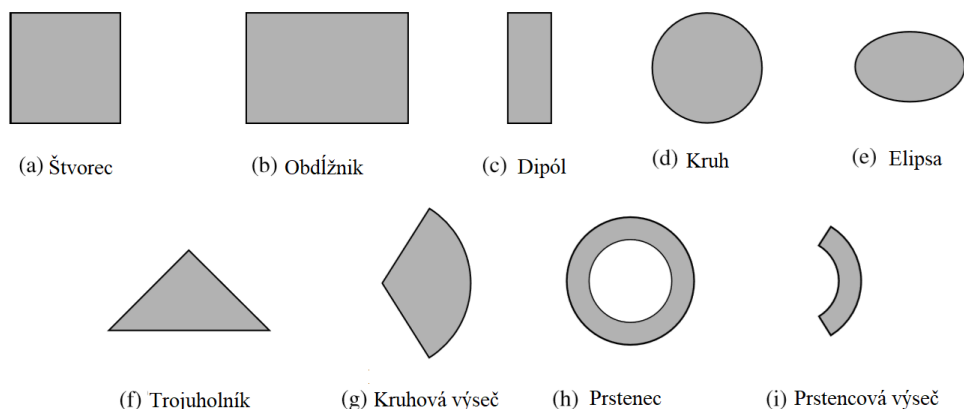
Niektoré literatúry udávajú skratku VSWR (*voltage standing wave ratio*). VSWR je definované ako pomer amplitúd napätia vlny, ktorá sa šíri v doprednom smere a vlny, ktorá je odrazená od neprispôsobenia medzi vedením a záťažou. Je to teda obdoba už spomínaného PSV. [2]



Obrázok 1.6: Grafické znázornenie PSV

2 Plošné antény

Plošné antény sú vo všeobecnosti používané relatívne dlhú dobu. Myšlienka plošných antén je datovaná od roku 1953, avšak patent na tento typ antény bol prijatý približne o dva roky neskôr. Známa a hojne používaná sa stala, až približne o 15 rokov neskôr a to v sedemdesiatych rokoch minulého storočia. Od vtedy našla anténa využitie v najrôznejších oblastiach priemyslu, ale aj bežného života. Vďaka veľmi malým rozmerom a možnosti vyrobiť anténu do veľa rôznych tvarov ju môžeme nájsť na miestach, kde je veľmi dôležitá hmotnosť, možnosť prispôsobenia sa povrchu, aerodynamický profil a samozrejme v neposlednom rade cena. Inými slovami anténa sa hojne používa v rôznych navádzaných strelách, lietadlách, satelitoch, ale môžeme sa s ňou stretnúť aj v každodennom živote v mobilných telefónoch. Tento typ antény je vo všeobecnosti obľúbený vďaka jej rôznorodým vlastnostiam. Cenovo je anténa veľmi výhodná, pretože je relatívne lacná na výrobu. Vďaka jej tvaru môže byť nainštalovaná na akýkoľvek povrch, alebo miesto. Tento typ antény môže byť navrhnutý do rôznych tvarov. Tento tvar, avšak nemení len vizuálny tvar antény, ale aj jej konkrétne vlastnosti. Správnym návrhom tvaru môžeme docieľiť rôzne frekvencie na ktorých anténa pracuje, polarizáciu antény, alebo jej impedanciu. V prípade, že do návrhu zahrnieme napr. diódu s premenlivou kapacitou, ktorá je závislá na napätí, môžeme dosiahnuť, že spomenuté vlastnosti nebudú pevne stanovené, ale bude možnosť ich meniť bez potreby výroby novej antény. Ako každá anténa, aj táto sa nevyhne nejakým určitým nevýhodám. Hlavné nevýhody antény tohto typu sú jej malá účinnosť, vysoké Q (niekedy až 100), ktoré v jednoduchosti povedané určuje šírku frekvenčného pásma antény, veľmi úzke frekvenčné pásmo, alebo nízka polarizácia. [1]



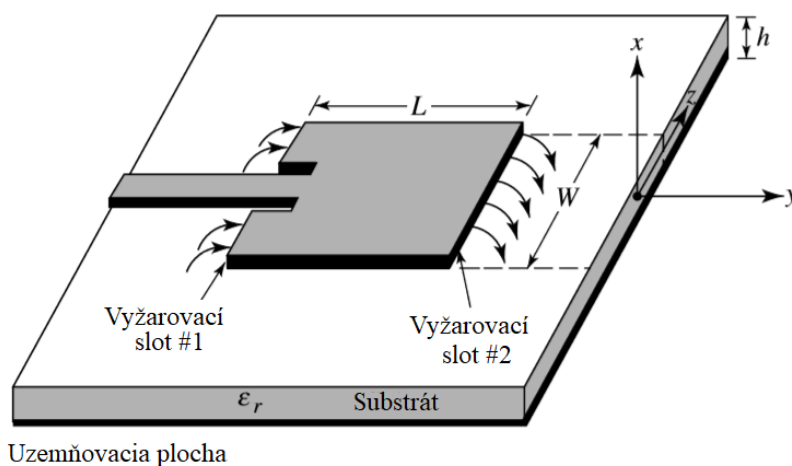
Obrázok 2.1: Bežné tvary plošných antén

2.1 Konštrukcia antény

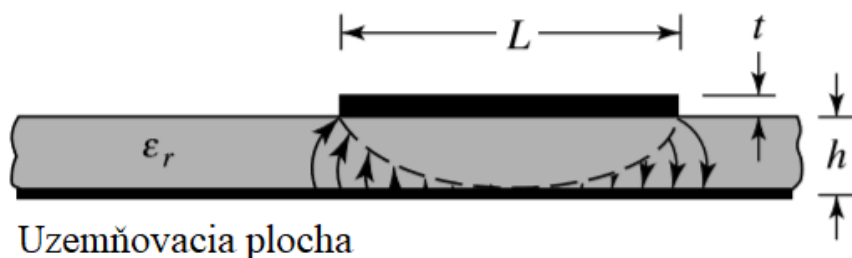
Plošné, alebo aj mikropásikové antény, pozostávajú z veľmi tenkého kovového pásiku ($t \ll \lambda_0$), čiže inými slovami, hrúbka sa volí výrazne menšia, ako je vlnová dĺžka voľného priestoru. Kovový pásik je umiestnený nad uzemňovacou plochou vo vzdialenosti ($0,003 \lambda_0 \leq h \leq 0,05 \lambda_0$). Medzi kovovým pásikom a uzemňovacou plochou sa nachádza vrstva dielektrika, zvyčajne dielektrický plát, často aj označovaný ako substrát. [1][2]

Pri návrhu antény je možné vybrať z veľkého množstva rôznych substrátov, ale ich relatívna permitivita, označovaná ako ϵ_r , zvyčajne spadá do rozmedzia $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Najvhodnejšia voľba je substrát s nízkou hodnotou relatívnej permitivity. Výber správneho substrátu je veľmi dôležitý pre dosiahnutie konečných požadovaných vlastností antény. Pri správnej voľbe, získame lepšiu efektivitu antény, väčší frekvenčný rozsah, ale na druhú stranu, zvýši sa cena realizácie. Tenké substráty s vysokou hodnotou relatívnej permitivity sa skôr hodia na realizáciu mikrovlnných obvodov, avšak použitie takéhoto substrátu spôsobí zúženie frekvenčného pásma antény a menšiu efektivitu, ako pri voľbe vhodnejšieho substrátu. [1]

Vo všeobecnosti teda platí, že zvyšovanie výšky použitého substrátu zlepšuje efektivitu plošnej antény a zabezpečuje rozšírenie frekvenčného pásma až do 35%. Vyžarovacie elementy, a napájacie vedenie sú zvyčajne vyleptané do samotného substrátu. Vyžarovacia časť antény môže nadobúdať rôzne tvary. Od štvorcov cez jednoduchý pásik až po trojuholníkový, kruhový až po rôzne zložené, či už pravidelné, alebo nepravidelné tvary. Medzi najatraktívnejšie tvary antén patria štvorcové, obdĺžnikové, ale aj kruhové podoby a to hlavne vďaka ich jednoduchosti na návrh, výrobu a dobrým vyžarovacím charakteristikám. Veľkej obľube sa tešia aj jednoduché dipóly, ktoré zaberajú väčšiu šírku pásma aj vďaka svojim malým rozmerom. Pre ich tvar sa hojne používajú na návrh a realizáciu anténnych sústav. [1]



Obrázok 2.2: Plošná anténa – pohľad z vrchu [1]



Obrázok 2.3: Plošná anténa – pohľad z boku [1]

2.2 Napájanie

Ako každá elektronická súčiastka potrebuje k svojmu fungovaniu určitý druh napájania, tak aj plošná anténa nedokáže fungovať bez energie. Existuje veľa spôsobov a rôznych konfigurácií ako anténu napájať, ale vo všeobecnosti sa používajú štyri najpopulárnejšie spôsoby. Medzi tieto metódy patria kontaktné metódy:

- napájanie mikropásikovým vedením
- napájanie koaxiálnou sondou

a dva spôsoby kedy napájanie nie je priamo pripojené na anténu, čiže inými slovami nekontaktné metódy:

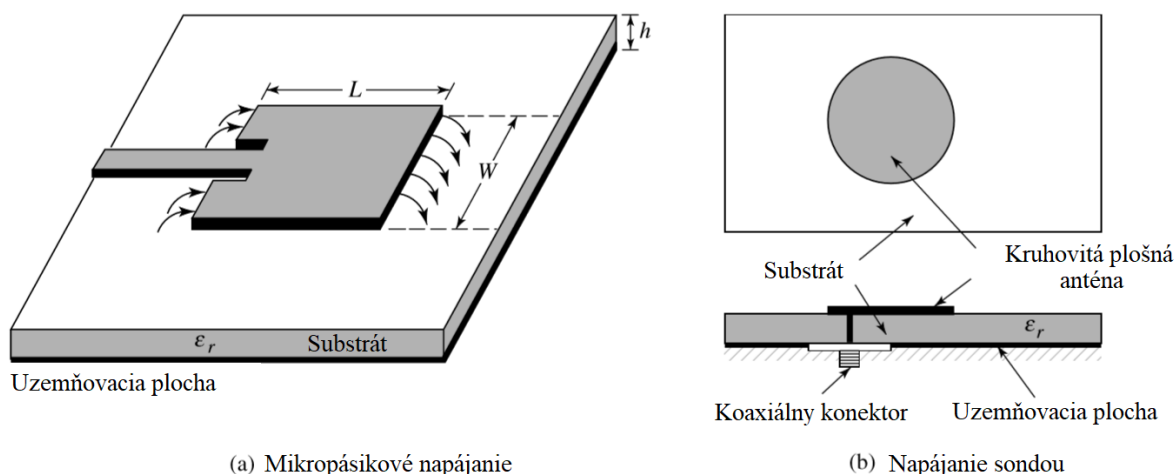
- napájanie viazané apertúrou (aperture coupling)
- budenie blízkym poľom (proximity coupling) [1]

2.2.1 Napájanie mikropásikovým vedením

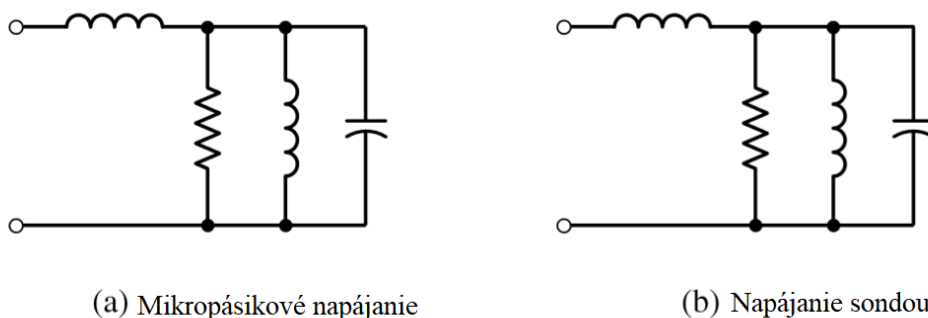
Napájanie mikropásikovým vedením zabezpečuje vodivý pásik s rozmermi omnoho menšími ako samotná anténa. Pásik je napojený priamo na vyžarovaciu časť antény, ako je ukázané na obrázku č. 2.4a. Veľká výhoda tohto typu napájania je, že vodivý pásik je vyleptaný na tom istom substráte ako samotná anténa. Tento typ napájania je vo všeobecnosti veľmi jednoduchý na výrobu, prispôsobenie i na návrh, veľká výhoda je taktiež možnosť zmeny impedancie. Ekvivalentný obvod pre mikropásikové napájanie je možné vidieť na obrázku č. 2.5a. Problém spojený s používaním tohto typu napájania je parazitné vyžarovanie samotného vedenia a vznik povrchových vln, čo má za následok zúženie frekvenčného pásma samotnej antény. Tento problém je ovplyvnený výškou substrátu. Platia rovnaké podmienky ako pre anténu, a teda čím je výška substrátu vyššia, tým je vyžarovanie silnejšie. Teda voľba mikropásikového napájania nie je vhodná pri výbere substrátu s relatívne veľkou výškou. [1][2]

2.2.2 Napájanie koaxiálnou sondou

Ďalší spôsob napájania antény je napájanie koaxiálnou sondou. Pri použití metódy napájania koaxiálnou sondou je vnútorný vodič koaxiálneho konektoru pripojený k samotnej vyžarovacej časti antény a vonkajší vodič je pripojený na uzemňovaciu plochu. Spôsob pripojenia je možné vidieť na obrázku č. 2.4b. Takýto spôsob napájania je taktiež jednoduchý na výrobu i prispôsobenie, avšak pri použití veľmi tenkého substrátu $h < 0,02 \lambda_0$ je návrh pomerne zložitejší, pretože je veľmi ťažké urobiť aproximačný model pre výpočty. Výhoda oproti prvej metóde je že napájanie môže byť umiestnené v ľubovoľnej polohe, avšak najsilnejšia väzba nastáva v prípade, kedy je vnútorný vodič koaxiálneho konektoru pripojený na okraj vyžarovacej časti antény. Taktiež treba spomenúť malé parazitné vyžarovanie, ktoré táto metóda zabezpečuje. Hlavné nevýhody tohto typu napájania je potreba vyvrtania diery do samotného substrátu a koaxiálny konektor samotný, pretože vyčnieva von, čo znemožňuje rovinný tvar antény, avšak nie všetky realizácie si priamo vyžadujú prevrtanie substrátu. Problém nastáva aj pri použití veľmi vysokého substrátu, kedy dochádza k predlžovaniu vnútorného vodiča, čo má následok zvyšovanie induktívneho charakteru vstupnej impedancie a tak následné problémy s napájaním. Ekvivalentný obvod pre napájanie koaxiálnou sondou možno vidieť na obrázku č. 2.5b. [1][2]



Obrázok 2.4: Spôsoby napájania [1]



Obrázok 2.5: Ekvivalentné obvody napájania [1]

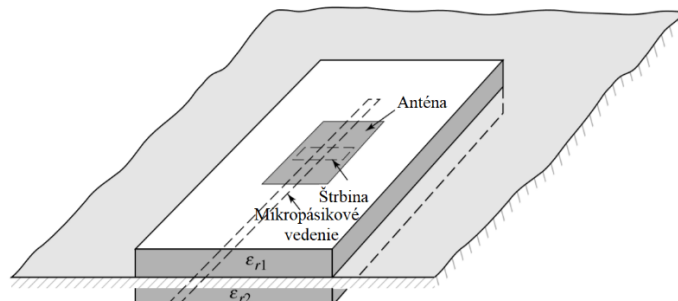
2.2.3 Napájanie viazané apertúrou

Ďalší a síce tretí spôsob ako je možné anténu napájať je metóda tzv. aperture coupling, alebo aj napájanie viazané apertúrou. Tento typ napájania pozostáva z dvoch substrátov, ktoré sú oddelené uzemňovacou plochou, ako je možno vidieť na obrázku č. 2.6. Na spodnom substráte z jeho spodnej strany sa nachádza mikropásikové napájanie, ktorého energia sa do samotnej antény dostáva cez štrbinu nachádzajúcu sa na uzemňovacej ploche, ktorá oddeľuje spomenuté substráty. Inak povedané väzba medzi napájacím mikropásikom a samotnou anténou je tvorená cez spomínanú štrbinu a je sprostredkovaná magnetickým poľom. Veľkosť väzby určuje samotná štrbina a to svojou veľkosťou, svojím uložením a tvarom. Spodný substrát má zvyčajne vyššiu hodnotu relatívnej permitivity, naopak horný substrát je tenší s nižšou hodnotou relatívnej permitivity. Uzemňovacia plocha medzi substrátmi zároveň slúži ako izolátor a zabraňuje vzájomnej interferencii samotnej antény a mikropásikového napájania a znižuje parazitné vyžarovanie napájania na minimum. Ako už bolo spomenuté, pri tomto type napájania vlastnosti substrátu, šírka napájacieho pásiku, veľkosť ale aj pozícia štrbiny hrajú veľkú rolu pri návrhu a ovplyvňujú tak celkové vlastnosti antény. Impedančné prispôsobenie antény môžeme dosiahnuť zmenami šírky mikropásikového napájania, alebo veľkosťou samotnej štrbiny. Hlavnou nevýhodou tohto napájania je zložitosť realizácie, ktorá je z pomedzi všetkých typov najzložitejšia. Pri použití napájania viazaného apertúrou taktiež stúpajú rozmery antény a to hlavne výška. Pre tento typ taktiež existuje ekvivalentný obvod, ktorý je možno vidieť na obrázku 2.8c. [1][2]

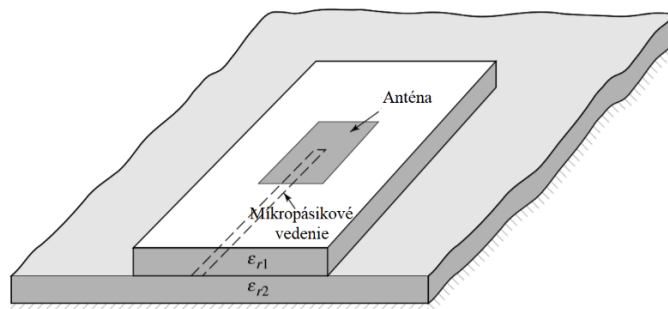
2.2.4 Budenie blízkym poľom

Ďalší v poradí a zároveň posledný spôsob, ktorý bude spomenutý je tzv. proximity coupling, alebo aj budenie blízkym poľom. V tomto prípade sú prítomné 2 substráty, medzi ktorými sa nachádza napájací mikropásik, samotná anténa sa nachádza na vrchnej časti horného substrátu ako možno vidieť na obrázku č. 2.7. Substráty je možné voliť rôzne podľa potreby, aby boli dosiahnuté individuálne požiadavky a vlastnosti. Substráty sa volia podľa dĺžky napájacieho mikropásiku a zároveň aj pomeru šírky samotnej antény ku vzdialenosti od napájacieho

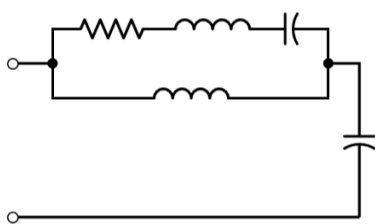
mikropásiku. Výroba je relatívne náročná, hlavne kvôli potrebe precízne uložiť oba substráty. Použitím dvoch substrátov sa taktiež zvyšuje výška antény. Ekvivalentný obvod je zobrazený na obrázku č. 2.8d. [1]



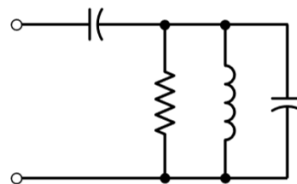
Obrázok 2.6: *Napájanie viazané apertúrou* [1]



Obrázok 2.7: *Budenie blízky polom* [1]



(c) Aperture coupling



(d) Proximity coupling

Obrázok 2.8: *Ekvivalentné obvody napájania* [1]

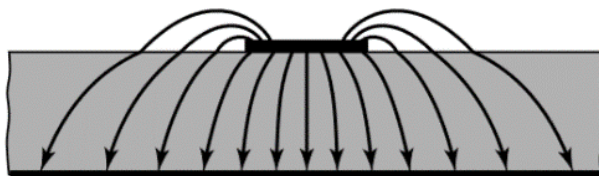
2.3 Metódy analýzy plošných antén

V súčasnej dobe existuje veľké množstvo spôsobov analýzy plošných antén. S pomedzi všetkých modelov pre analýzu je najpoužívanejšia tzv. analýza metódou vedenia. Táto metóda je veľmi rozšírená, najmä vďaka jej jednoduchosti, ale zároveň aj presnosti pri porovnaní s inými metódami. Pri vysvetlení tejto metódy budeme pre jednoduchosť pracovať so štvorcovou plošnou anténou. Keďže plošná anténa má konečné rozmery (dĺžka a šírka), na koncoch antény dochádza k tomu, že siločiar elektromagnetického poľa lemujú okraje práve tejto antény ako je možné vidieť na obrázku 2.9. K tomuto javu dochádza po celej dĺžke, ale aj šírke antény. Tento jav možno označiť ako funkciu rozmerov antény a výšky substrátu. Pre hlavnú rovinu platí, že táto funkcia je daná pomerom dĺžky antény a výšky substrátu $\left(\frac{L}{h}\right)$ a relatívnej permitivity substrátu. Ak platí $\frac{L}{h} \gg 1$ spomínaný jav je potlačený, avšak treba ho brať do úvahy, pretože ovplyvňuje rezonančnú frekvenciu. Mikropásik je v podstate nehomogénna linka s dvomi dialektrikami, ktoré sú vzduch a samotný substrát. Z obrázka č. 2.9 je patrné, že drvivá väčšina siločiar je koncentrovaná práve v substráte a vo vzduchu sa nachádza len malá časť. V prípade, že platí $\frac{W}{h} > 1$ a $\epsilon_r > 1$, väčšina siločiar je koncentrovaná v substráte. Tento efekt má za následok, že anténa pôsobí oproti svojim reálnym rozmerom z hľadiska siločiar širšie. Práve kvôli faktu, že siločiar sa nachádzajú aj vo vzduchu musíme zaviesť tzv. efektívnu konštantu ϵ_{eff} . Túto konštantu možno získať zo vzťahu:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

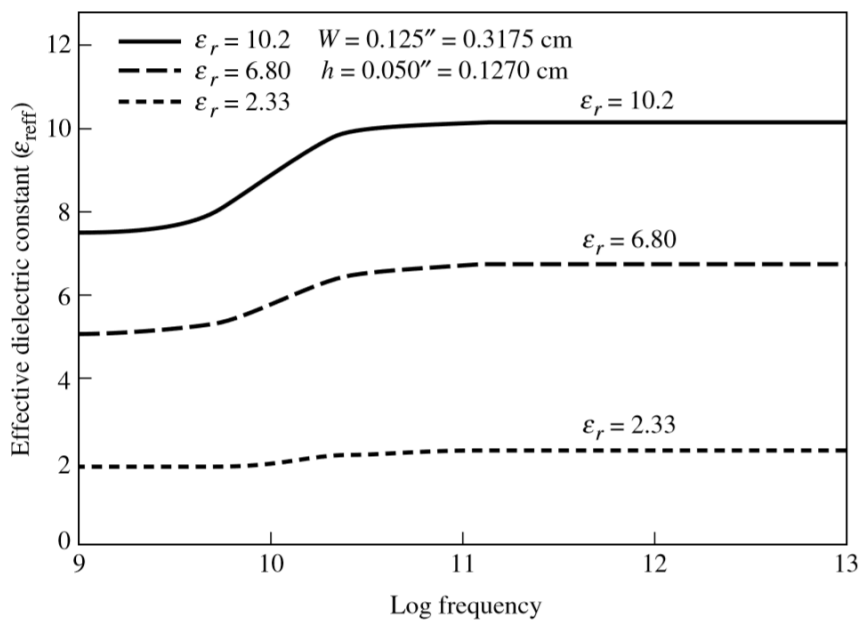
kde ϵ_r je relatívna permitivita substrátu,

W je šírka antény, h je výška substrátu. [1][10]



Obrázok 2.9: Siločiar el. poľa [1]

Hodnota konštanty pre prípad, kedy sa nad substrátom nachádza vzduch je v rozmedzí $1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r$. Pre realizácie kedy $\epsilon_r \gg 1$, hodnota efektívnej konštanty a relatívnej permitivity substrátu sú takmer rovnaké. Konštanta je taktiež závislá od frekvencie. Všeobecne platí, čím vyššia frekvencia, tým je menší podiel siločiar, ktoré sú koncentrované vo vzduchu a tým je hodnota efektívnej konštanty bližšie k hodnote relatívnej permitivity, tento jav možno sledovať na obrázku 2.10. [1][2]



Obrázok 2.10: Efektívna konštanta v závislosti na frekvencii [1]

Ako už bolo spomenuté, anténa sa javí širšia ako v skutočnosti je. Tento jav je možné vidieť na obrázku 2.11, kde L reprezentuje skutočnú dĺžku antény a ΔL je dĺžka, ktorá je reprezentovaná siločiarami. Táto dĺžka je závislá na efektívnej konštante, ale aj na pomere šírky a výšky a jej približnú veľkosť dostaneme zo vzťahu:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.5)$$

kde ϵ_{eff} je efektívna konštanta,

W je šírka, h je výška. [1]

Rezonančnú frekvenciu je možné dostať zo vzťahu, ktorý berie do úvahy spomínané zakrivenie siločiar:

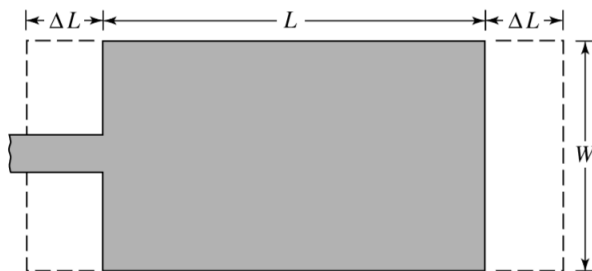
$$f_r = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

kde v_0 je rýchlosť svetla,

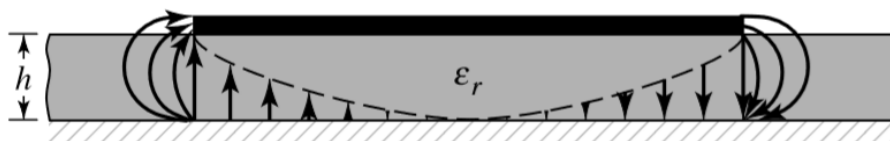
L je dĺžka antény,

ϵ_r je relatívna permitivita substrátu,

q je faktor, ktorý určuje zakrivenie siločiar. [1]



Obrázok 2.11: Dĺžka antény – pohľad z vrchu [1]



Obrázok 2.12: Dĺžka antény – pohľad z boku [1]

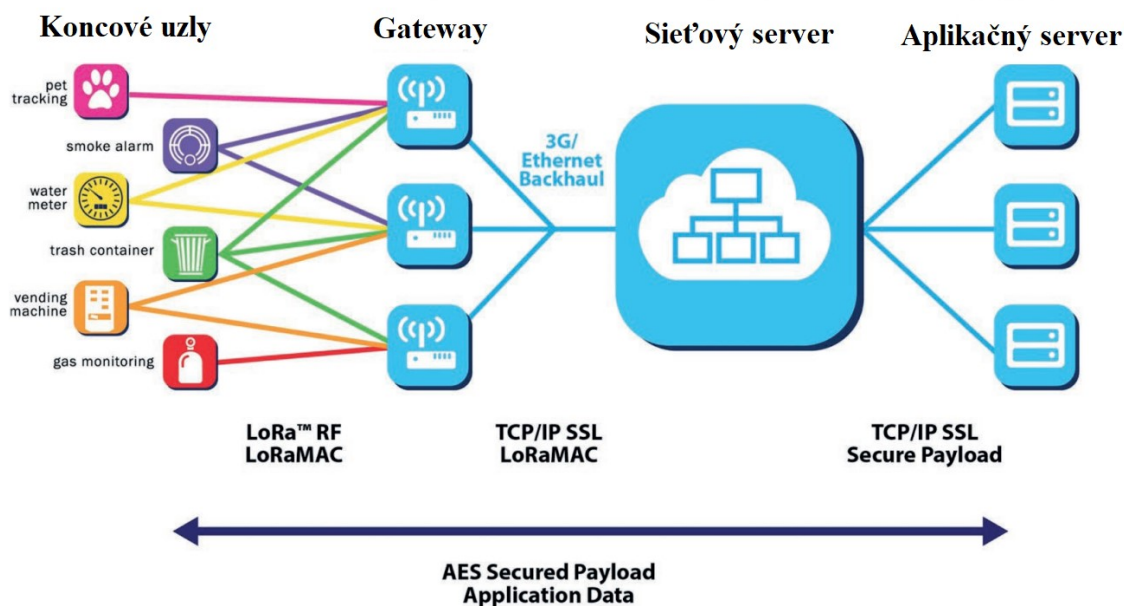
3 SúčasnÉ varianty antén, pracujúce v pásme 868 MHz

3.1 Frekvenčné pásmo 868 MHz a LoRaWAN

Ako už bolo v úvode tejto práce spomenuté, navrhovaná anténa je primárne určená pre spoluprácu s technológiou LoRaWAN a musí preto fungovať vo frekvenčnom pásme 868 MHz. Podľa všeobecného oprávnenia ČTÚ k využívaniu rádiových frekvencií a k prevádzkovaní zariadení krátkého dosahu "Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/01.2019-1" je toto pásmo označované ako pásmo "g". Pásmo je definované vo frekvenčnom rozmedzí 863,0 - 870,0 MHz. Maximálny povolený výkon v tomto pásme sa pohybuje na hodnote 25 mW, čomu zodpovedá výkonová úroveň 13,98 dBm. V tomto frekvenčnom pásme možno prevádzkovať zariadenia so šírkou pásma ≤ 100 kHz a moduláciou FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Uprednostňuje sa šírka pásma 100 kHz s následným možným delením na 50, alebo 25 kHz. Toto pásmo nemožno použiť pre vysielanie analógových audio signálov s výnimkou prenosu hlasu. [11]

LoRaWAN, alebo aj Long Range Wide Area Network je nízkopríkonová technológia pre bezdrôtový prenos informácií využívaná najmä v oblasti IoT (Internet of Things). Je to celosvetovo rozšírená technológia, ktorá funguje na rôznych frekvenčných pásmach, pričom v Európe je to pásmo 868 MHz. LoRaWAN ponúka rôzne prenosové rýchlosti, ktoré závisia od použitia konkrétneho kanálu a pohybujú sa v rozmedzí od 0,3 kb/s až 50 kb/s. Technológia definuje 10 kanálov, kde 8 z nich má viacnásobnú dátovú rýchlosť od 250 b/s do 5,5 kb/s ďalej definuje jeden vysokorýchlostný kanál s rýchlosťou 11 kb/s a samostatný (G)FSK kanál s rýchlosťou 50 kb/s. Kanály 0–7 majú pevne stanovenú šírku kanálu, ktorá odpovedá 125 kHz a túto šírku nemožno modifikovať, avšak stredová frekvencia kanálu môže byť upravená a prenos dát následne prebieha bez potreby inej konfigurácie. Súčasne je možné využívať všetkých 8 kanálov, pričom prenosová rýchlosť sa mení vzhľadom na rôzne faktory, napr. vzhľadom na vzdialenosť. Kanál číslo 8 je špecifický tým, že jeho stredová frekvencia môže byť opäť ľubovoľne zvolená a je taktiež možné vybrať šírku kanálu, ktorá je 125, 250, alebo 500 kHz. Posledný a síce kanál číslo 9 je priamo "spojený" s demodulátorom a ponúka zmenu jeho šírky a prenosovej rýchlosti. Prenosová rýchlosť je v tomto prípade najvyššia zo všetkých spomenutých. LoRaWAN sieť využíva architektúru hviezdy, ktorá zaisťuje dlhú životnosť batérie pri zachovaní veľkého dosahu. Za hlavné rysy tejto technológie teda považujeme:

- minimálnu spotrebu – výdrž na batérii až niekoľko rokov
 - veľmi veľký dosah – v otvorenom priestore až desiatky kilometrov
 - obojsmerná komunikácia, bezpečnosť – dochádza k šifrovaniu prenášaných správ
 - krátke správy – rádovo len niekoľko bajtov
 - veľmi malé množstvo správ – obvykle jednotky denne
 - veľká citlivosť LoRa gateway zariadení – v závislosti od zariadenia až -142,5 dBm
- [12][13]



Obrázok 3.1: Architektúra siete LoRa

3.2 Antény na trhu

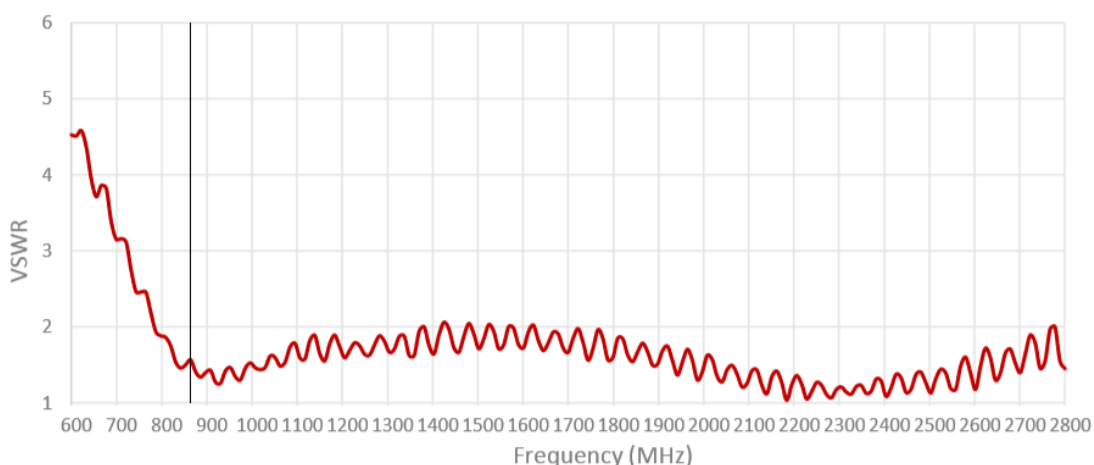
Ako už bolo spomenuté, v súčasnej dobe, kedy je potrebné prenášať informácie, či už na krátku, alebo dlhú vzdialenosť, sú antény neodmysliteľnou súčasťou dnešnej technológie. Bezdrôtovú technológiu môžeme dnes nájsť doslova v každej oblasti priemyslu, obchodu ale aj bežného života. Preto je veľmi jednoduché kúpiť už navrhnutú anténu vo väčšine frekvenčných pásiem, presne podľa požiadavku zákazníka. Avšak pri určitých technológiách je výber potrebnej antény pomerne ťažší, pretože ponuka, hlavne pri potrebe antény na konkrétnu frekvenciu, je relatívne malá. Cenová dostupnosť veľmi súvisí s našimi konkrétnymi požadovanými vlastnosťami. Táto práca, však nie je venovaná všetkým anténam na ľubovoľnom frekvenčnom pásme, ale zaoberá sa konkrétnou problematikou a to anténami, ktoré spolupracujú s technológiou IoT, resp. LoRaWan, a síce ich frekvenčné pásmo je 868 MHz. V tejto časti mojej práce sa budem venovať práve niekoľko konkrétnym modelom antén od rôznych výrobcov. Mnou vybrané antény nie sú však len plošné, ale rôzne druhy, ktoré spadajú do tohto frekvenčného pásma.

Prvá anténa, ktorej sa budem venovať je anténa od európskeho výrobcu „2J antennas“. Táto anténa s označením typu „2J300M“ dokáže pracovať až v troch frekvenčných pásmach a to 698-960 MHz, 1710-2170 MHz a 2500-2700 MHz. Ako z frekvenčného pásma možno vidieť, táto anténa je síce schopná pracovať aj v pásme 868 MHz, ale primárne je určená na technológie 2G, 3G a 4G. V prípade, kedy sa pozrieme na vlastnosti tejto antény iba pre frekvencie, ktoré sú potrebné pre technológiu LoRaWan, dostávame nasledujúce vlastnosti. Jej účinnosť je približne len 47%, čo je relatívne nízka hodnota. Zisk tejto antény je taktiež nízky, pri frekvenciách blízkyh 868 MHz je jeho hodnota približne 1,4 dBi, ale naopak jeho priemerná

hodnota je len -3,3 dBi. Hodnota VSWR je približne 1,5:1, čo je oproti žiadúcej hodnote 1:1, tiež relatívne vysoké číslo, avšak stále pod hranicou nepoužiteľnosti. Anténa je všesmerová s impedanciou 50 Ω a dodávaná s konektorom SMA (SubMiniature version A). Ako je vidno z parametrov tejto antény, dokáže síce pracovať na požadovanej frekvencii, ale na spoluprácu s technológiou LoRaWan nie je príliš vhodná, nie len vďaka vlastnostiam, ale aj veľkosti, pretože zariadenie je relatívne rozmerné. [14]



Obrázok 3.2: Anténa 2J300M [14]

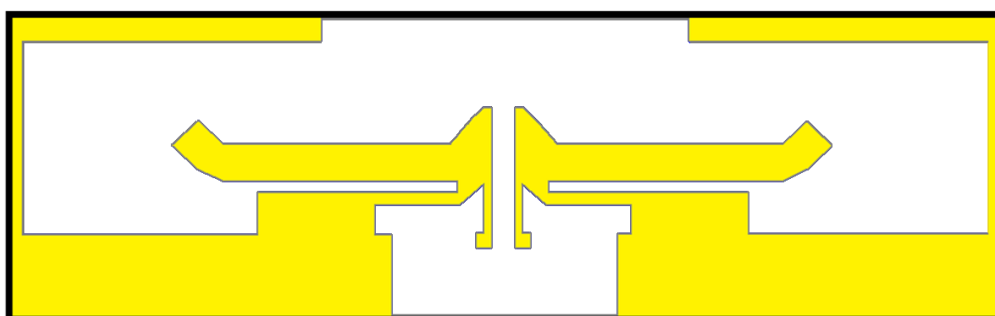


Obrázok 3.3: Závislosť VSWR na frekvencii antény 2J300M [14]

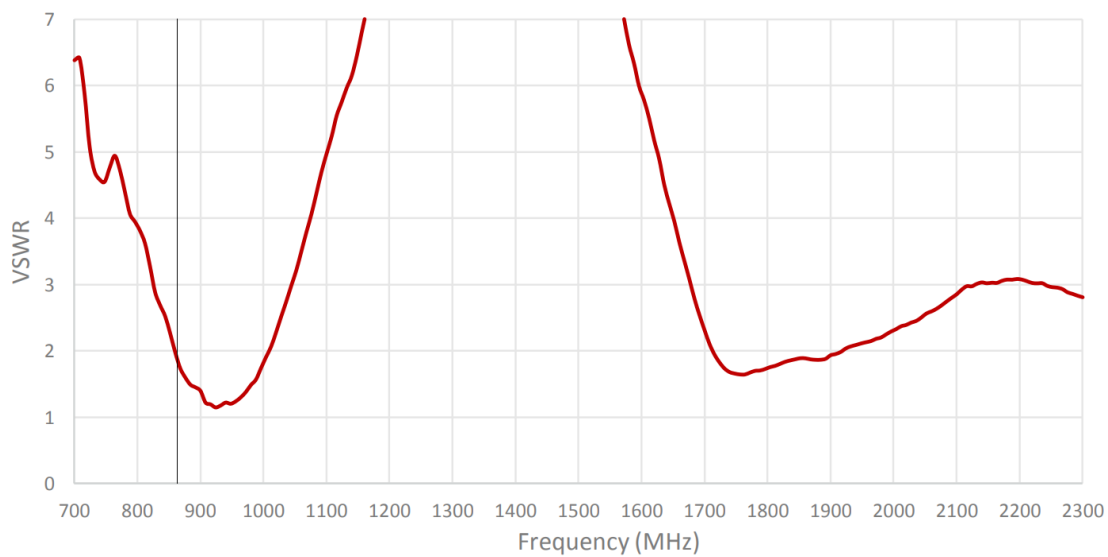
Ďalšia anténa pochádza taktiež od výrobcu „2J antennas“ typu „2JP0104P“, no čím sa už na prvý pohľad líši od prvej spomenutej, je jej konštrukciou. Táto anténa spadá do kategórie plošných antén, čo ju už teraz robí vhodnejšiu, pre použitie a spoluprácu s technológiou LoRaWan, nakoľko jej rozmery sú oveľa menšie ako pri prvej spomenutej. Táto anténa, rovnako ako prvá, taktiež nie je navrhnutá primárne na pásmo 868 MHz, ale dokáže pracovať v dvoch frekvenčných pásmach a to 824-960 MHz a 1710-2170 MHz, čiže je primárne určená pre príjem 2G, alebo 3G signálu. Účinnosť tejto antény je pre pásmo 868 MHz približne 45%, čo je oproti účinnosti vo vyšších frekvenciách relatívne nízke číslo. Priemerná hodnota zisku je v tomto prípade približne -3,6 dBi. VSWR nadobúda hodnotu 1,5:1, čo je hodnota, ktorá sa blíži hranici použiteľnosti. Anténa je taktiež všesmerová a jej impedancia je 50 Ω . Dodávaný konektor k tejto anténe je typu U.FL. [15]



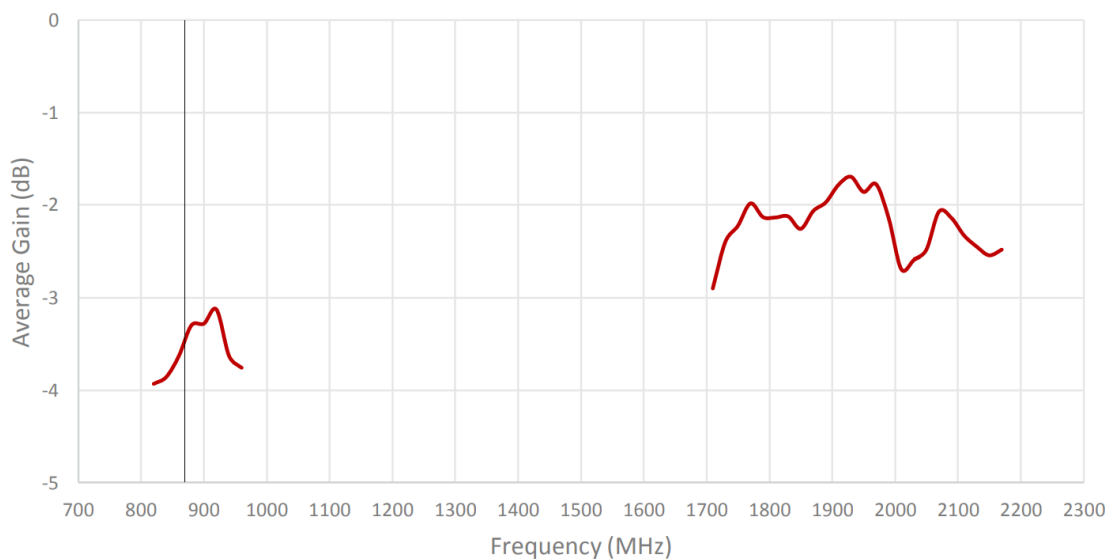
Obrázok 3.4: Anténa 2JP0104P [15]



Obrázok 3.5: Prekreslený tvar antény 2JP0104P

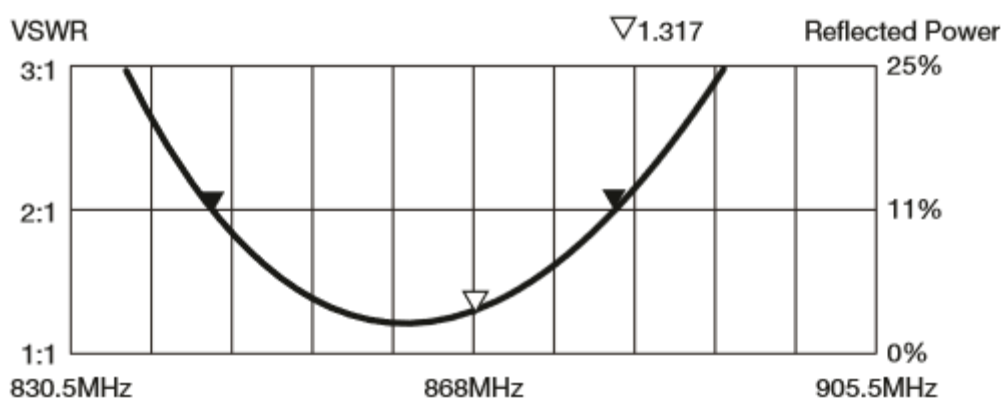


Obrázok 3.6: Závislosť VSWR na frekvencii antény 2JP0104P [15]



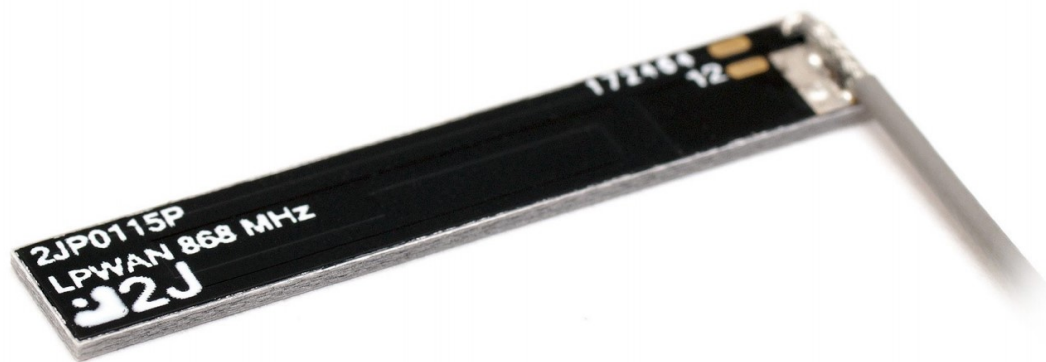
Obrázok 3.7: Závislosť zisku na frekvencii antény 2JP0104P [15]

Tretia anténa s označením „ANT-868-SP“ je tak isto plo n , ako aj predchádzajúca, ale pochádzajúca od amerického výrobcu „Linx“. Avšak líši sa hlavne v rozmeroch, kedy v prípade tejto antény sú rozmery oveľa kompaktnejšie a tak aj prijateľnejšie pri pou it  v rámci technológie LoRaWAN a frekven n e pásme, v ktorom anténa pracuje sa blíži konkrétnemu p smu 868 MHz. P sme je v tomto prípade 850-885 MHz, kedy stredn  frekvencia je práve 868 MHz a celkov    irka pásma predstavuje 35 MHz. T to anténa poskytuje relatívne prijate n  vlastnosti pre použitie v rámci technológie LoRaWAN. Zisk antény sa pohybuje okolo hodnoty 1,1 dBi. Relatívne prijate n  je aj hodnota VSWR, ktor  sa na frekvencii 868 MHz pohybuje na hodnote 1,317:1. Hodnota impedancie je rovnak  ako pri predchádzajúcich anténach a to 50 Ω . Hodnotu účinnosti výrobcu v tomto prípade neudáva. Za zmienku ur  ite stojí aj vlastnosť antény, že dokáže fungovať v prostredí až do 130 C,   i e anténa je vhodn  aj do extr mnej iech podmienok, alebo prostredí s vysokou teplotou. [16]

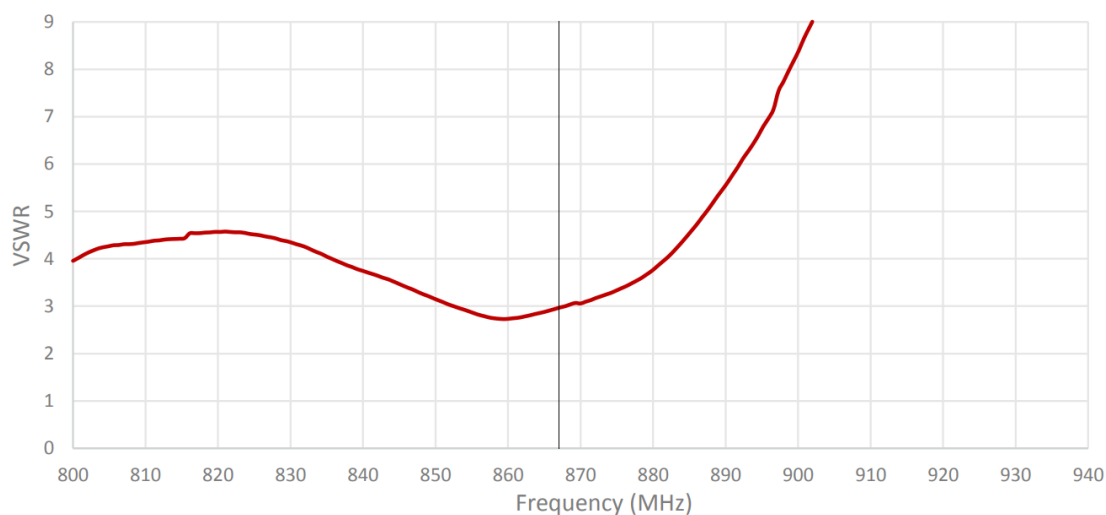


Obrázok 3.8: Závislosť VSWR na frekvencii antény ANT-868-SP [16]

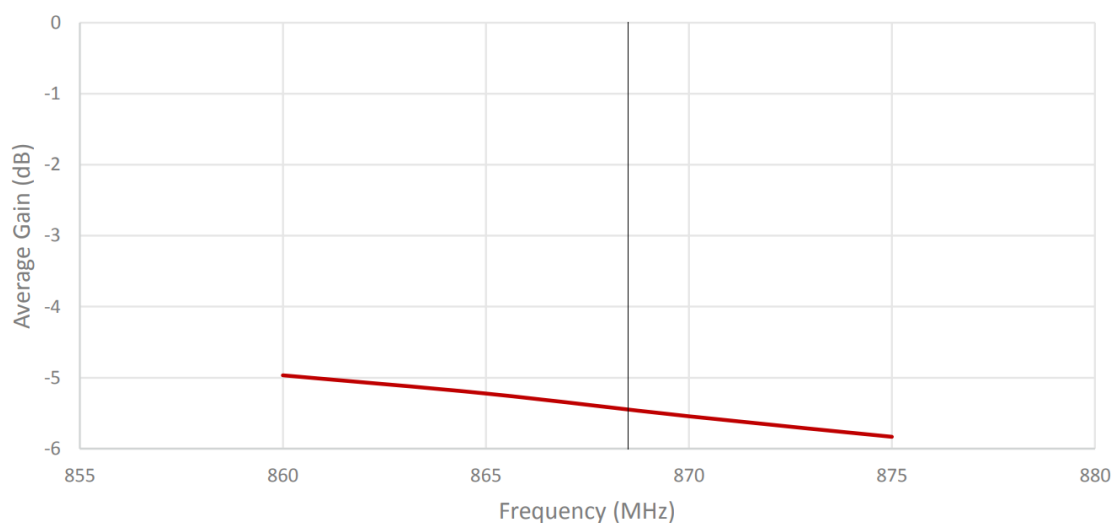
Nasledujúca anténa, taktiež plošná a spracovaním veľmi podobná ako predchádzajúca, pochádza od výrobcu „2J Antennas“ typu „2JP0115P“. Táto anténa sa svojím frekvenčným rozsahom z doposiaľ spomenutých najviac hodí na použitie práve pre pásmo 868 MHz. Anténa, v porovnaní s predchádzajúcimi, dokáže pracovať v najužšom rozsahu a to od 863 MHz do 870 MHz, čiže jej celková šírka pásma je len 7 MHz a je primárne určená pre pásmo 868 MHz. Veľmi atraktívna je aj jej forma spracovania. Anténa je navrhnutá do veľmi malých rozmerov, čo ju robí veľmi vhodnú na použitie pre spoluprácu s technológiou LoRaWAN, pretože môže byť použitá na takmer akejkolvek forme povrchu. Vlastnosti tejto antény sú v porovnaní s ostatnými relatívne zlé. Hodnota VSWR dosahuje hodnotu približne 2,9:1 v celom pásme, čo je veľmi nepriaznivá hodnota a pre správne fungovanie bude nevyhnutné navrhnuť obvod pre impedančné prispôbenie. Efektivita antény sa pohybuje na 29% a priemerný zisk zase okolo -5,3 dBi. Ako aj pri všetkých anténach impedancia sa pohybuje na hodnote 50 Ω . Anténa je vyrábaná a dodávaná s konektorom typu U.FL. [17]



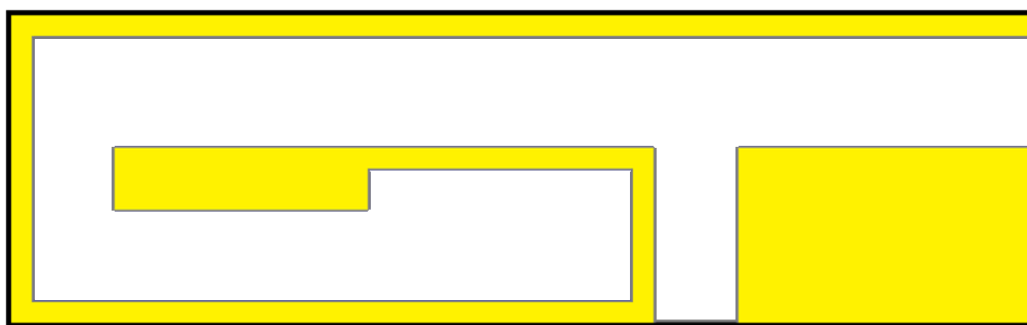
Obrázok 3.9: Anténa 2JP0115P [17]



Obrázok 3.10: Závislosť VSWR na frekvencii antény 2JP0115P [17]



Obrázok 3.11: Závislosť zisku na frekvencii antény 2JP0115P [17]



Obrázok 3.12: Prekreslený tvar antény 2JP0115P

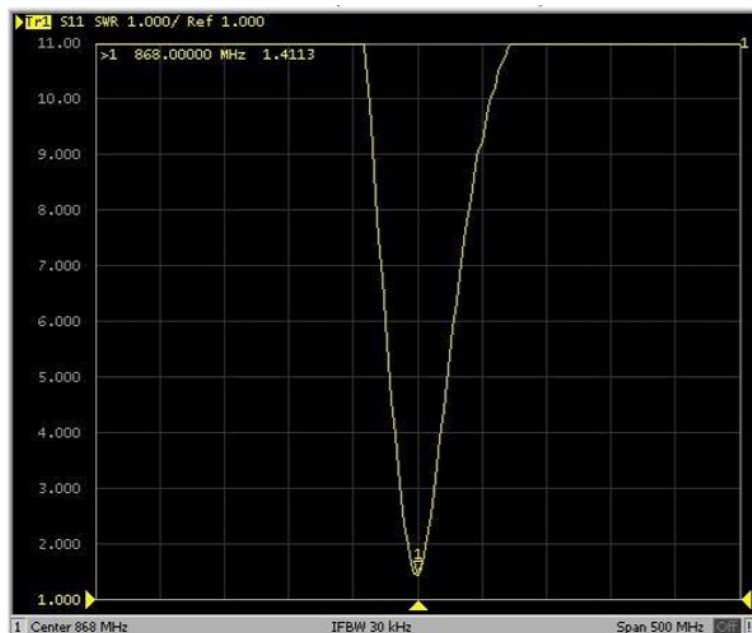
Ďalšia anténa v poradí, taktiež pochádza od výrobcu „2J antennas“ s typovým názvom „2J200GP“. Táto anténa je zaujímavá hlavne množstvom frekvenčných pásiem, na ktorých je schopná pracovať. Na použitie pre spoluprácu s technológiou LoRaWAN sa anténa veľmi nehodí, hlavne kvôli jej vyšším rozmerom, pretože je primárne určená pre upevnenie na stenu. Zariadenie dokáže pracovať na frekvenčných pásmach 850 MHz (technológia AMPS), 900 MHz (GMS), 1800 MHz (PCD), 1900 MHz (PCS), 2.1 GHz (3G), 2.4 GHz (WiFi a Bluetooth), 791-960 (4G). Z jej frekvenčných pásiem je na prvý pohľad zrejmé, že na spoluprácu s LoRaWAN nebude anténa najvhodnejšia, čo potvrdzujú aj jej vlastnosti. Zisk antény sa pohybuje na maximálnej úrovni 2,2 dBi, ale výrobca neuvádza konkrétne hodnoty, pre všetky frekvenčné pásma. Hodnota VSWR uvádzaná pre konkrétne pásma je, a pre frekvenčné pásmo 868 MHz sa pohybuje okolo hodnoty 1,5:1, čo je prijateľná hodnota. Hodnota efektivity taktiež výrobcom nie je uvádzaná. Ako každá spomenutá anténa aj táto má hodnotu impedancie 50 Ω . Konektor dodávaný výrobcom k tejto anténe je typu FME. Anténa ako väčšina iných dokáže pracovať v teplotnom rozmedzí od -40°C do +85°C. [18]

Anténa typu „0868AT43A0020“ vyprodukovaná americkým výrobcom „JOHANSON TECHNOLOGY“ má oproti skôr spomenutým zariadeniam veľkú výhodu, hlavne vďaka jej veľmi kompaktným rozmerom. Jej rozmery sa pohybujú v rozmedzí pár centimetrov, hlavne vďaka tomu, že sa jedná o plošnú anténu. V prípade jej frekvenčného pásma, ani táto anténa nie je priamo skonštruovaná pre pásmo 868 MHz, ale operuje v pásme 858-878 MHz, kedy jej šírka pásma sa pohybuje na hodnote 20 MHz, čo je doposiaľ jedno z najužších pásiem z pomedzi spomenutých antén. Výrobca taktiež uvádza optimálne hodnoty impedančného prispôsobenia a to konkrétne 3,9pF, 18nH, 0,3pF. V prípade impedančného prispôsobenia sa hodnota VSWR pohybuje okolo 1,15:1, čo je veľmi priaznivá hodnota a z doposiaľ spomenutých antén je táto hodnota najpriateľnejšia a teda aj najlepšia. Hodnota zisku už taká priateľná nie je, pretože sa jedná o plošnú anténu, priemerne sa pohybuje na úrovni -4,0 dBi. Keďže sa jedná o plošnú anténu, hodnota impedancie napájacieho pásika je udávaná 50 Ω . Dodávaný konektor, ako aj pri väčšine iných antén je typu SMA. Teplotné rozmedzie v ktorom anténa dokáže pracovať, tiež nie je ničím zaujímavé z dôvodu, že jeho hodnota je rovnaká ako pri väčšine iných antén a to -40°C až +85°C. [19]

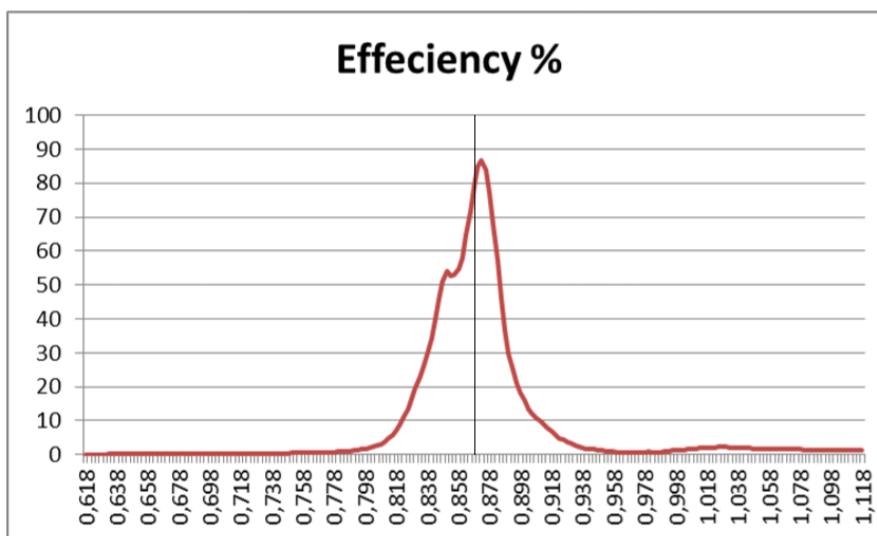
Ďalej bude spomenutá plošná anténa typu PIFA označená názvom „PL-6115B-868“ od českého výrobcu „Paoli“. Anténa je svojimi rozmermi relatívne malá, aj napriek tomu, že je uložená v ochrannom plastovom obale. Avšak tento plastový obal znemožňuje prispôsobenie a inštaláciu antény na ľubovoľný povrch. Anténa je navrhnutá priamo na pásmo 868 MHz a preto sa veľmi hodí na spoluprácu s technológiou LoRaWAN, čo potvrdzujú aj jej ďalšie vlastnosti. Jedna z týchto vlastností je účinnosť antény, ktorá je v tomto prípade najvyššia zo všetkých spomenutých a pohybuje sa na hodnote približne 80%, čo je veľmi vysoké číslo. Hodnota VSWR sa pre frekvenciu 868 MHz pohybuje na hodnote 1,4113:1, čo nie je malé číslo, ale stále relatívne priateľné. Hodnota zisku antény má hodnotu 3 dBi, čo je v porovnaní s predchádzajúcimi anténami a faktom, že sa jedná o plošnú anténu, taktiež relatívne vysoké číslo. Ďalšie vlastnosti sú už rovnaké, ako pri skôr spomenutých. Impedancia sa pohybuje, ako aj pri všetkých, na hodnote 50 Ω . Teplotné rozmedzie je taktiež rovnaké. Výrobcom dodávaný konektor je SMA. [20]



Obrázok 3.13: Anténa PL-6115B-868 [20]



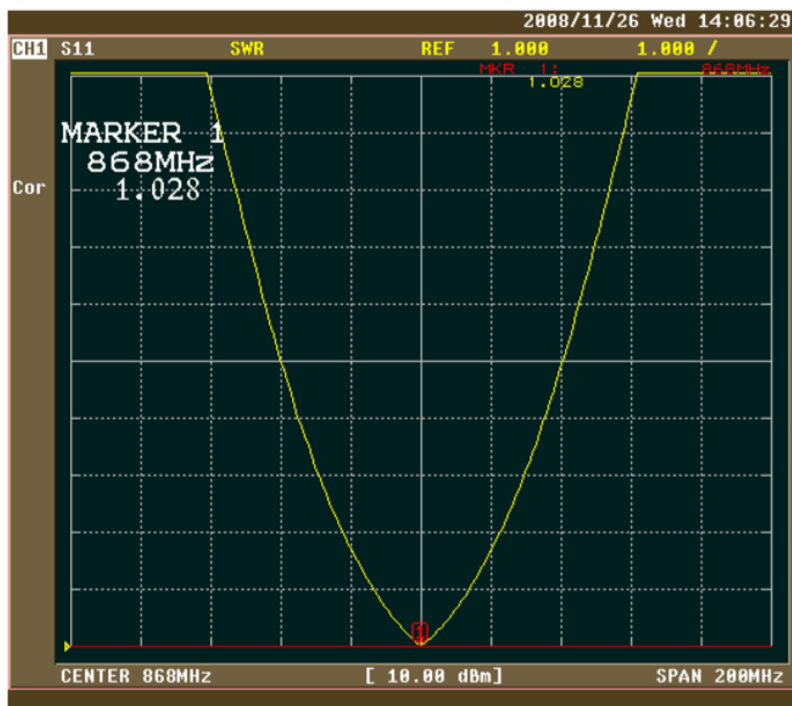
Obrázok 3.14: Hodnota VSWR pre frekvenciu 868 MHz [20]



Obrázok 3.15: Závislosť účinnosti antény PL-6115B-868 na frekvencii [20]

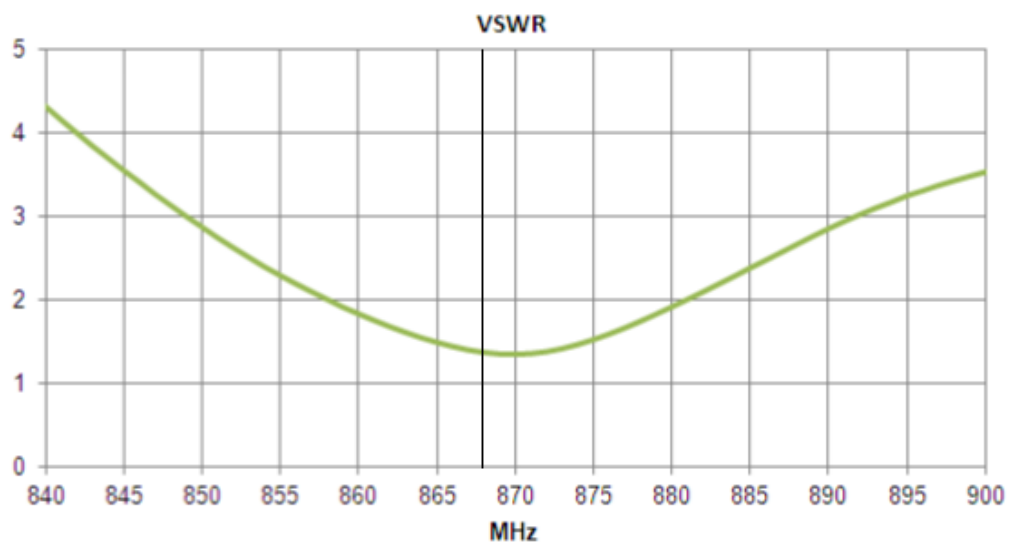
Výrobca „2J antennas“ má taktiež v ponuke plošnú anténu s označením typu „2JE05“. Zariadenie operuje v troch frekvenčných pásmach a to 434 MHz, 868 MHz a 915 MHz, čiže je primárne určená pre pásma ISM. Vlastnosti antény sa líšia od pásma, resp. frekvencie v ktorej sa pohybuje. Pre pásmo 868 MHz sa šírka pásma pohybuje na hodnote len 3 MHz a strednou frekvenciou práve 868 MHz, čo anténu robí vhodnú na spoluprácu s technológiou LoRaWAN len z časti, pretože neoperuje v celom pásme 868 MHz. Treba spomenúť aj rozmery antény, ktoré sú v tomto prípade veľmi priaznivé. Výrobca taktiež udáva hodnoty pre impedančné prispôsobenie,

ktoré sa pohybujú na hodnotách 27 nH, 6,8 nH, 4,7 pF. V prípade impedančného prispôsobenia sa potom hodnota VSWR pohybuje na 1,028:1, čo je doposiaľ najlepšia hodnota s pomedzi všetkých spomenutých. Hodnota zisku antény je naopak z doposiaľ spomenutých najhoršia a pohybuje v priemerne okolo -7 dBi. Účinnosť antény výrobcom nie je udávaná. Napájanie zariadenia je riešené koaxiálnou sondou a impedancia sa pohybuje na hodnote 50 Ω . Teplotný rozsah v ktorom je anténa schopná pracovať je opäť rovnaký ako pri predchádzajúcej. [21]

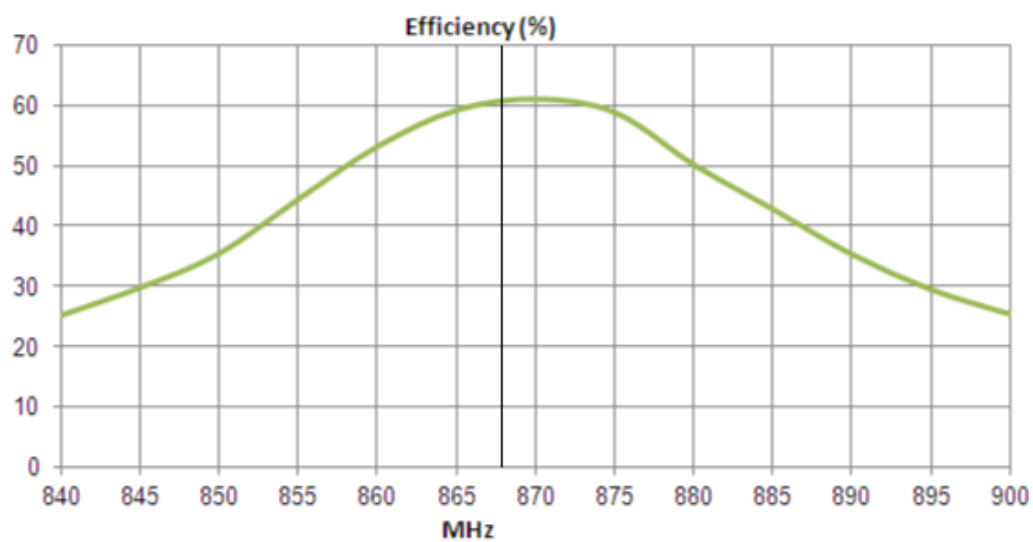


Obrázok 3.16: Hodnota VSWR antény 2JE05 pre frekvenciu 868 MHz [21]

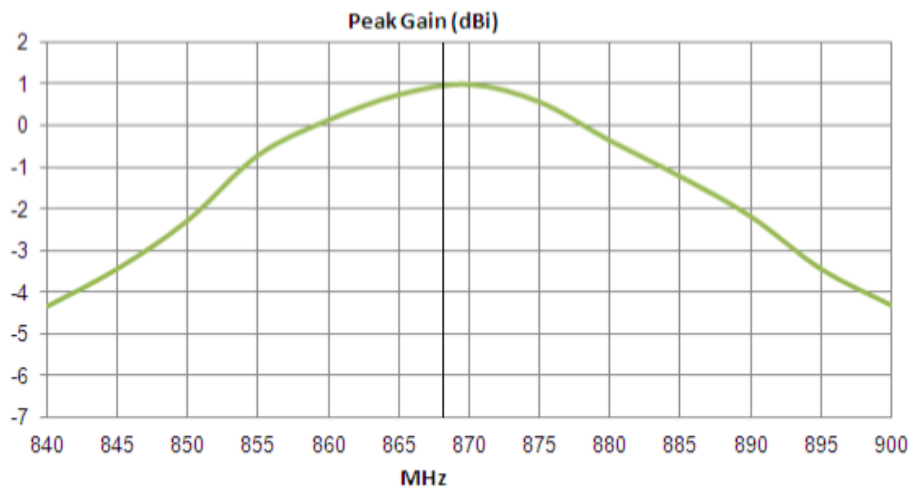
Posledná anténa opäť pochádza od výrobcu „Taoglas“. Zariadenie s typovým označením „ILA.02“ sa vyznačuje hlavne svojimi veľmi malými rozmermi, všesmerovosťou a relatívne dobrou účinnosťou. Anténa je schopná pracovať vo frekvenčnom pásme 868-870 MHz. Spomínaná účinnosť zariadenia sa pohybuje na hodnote 61%. Ďalšie vlastnosti ako zisk antény výrobca udáva v priemernej hodnote -3 dBi, avšak v maxime dosahuje 1 dBi. Hodnota VSWR sa oproti ostatným anténam veľmi nelíši a nadobúda teda hodnotu 1,4:1. Ako pri každej anténe aj táto nadobúda hodnotu impedancie 50 Ω . Konektor, ktorý výrobca dodáva je typu SMA(F). [22]



Obrázok 3.17: Hodnota *VSWR* v závislosti na frekvencii antény ILA.02 [22]



Obrázok 3.18: Hodnota účinnosti antény ILA.02 v závislosti na frekvencii [22]



Obrázok 3.19: Hodnota zisku v závislosti na frekvencii antény ILA.02 [22]

Z predchádzajúceho prieskumu vyplýva, že vo frekvenčnom pásme 868 MHz je schopn  pracovať relativne veľké množstvo antén, avšak v prípade potreby antény, ktor  je ur en  len pre toto pásme, celkov  počet dostupných antén značne klesá. Ďalšia vlastnosť, ktor  veľmi ovplyvňuje vhodnosť použitia antén na strane senzoru pre toto pásme je ich veľkosť. Rozmern  antény, ktor  by boli pou it  na strane senzoru sa pre toto použitie nehodia z dôvodu potreby použitia čo najmen ich a zároveň najlacnej ich antén. Antén, ktor  splňajú podmienku malých rozmerov a zároveň relativne dobrých vlastnosťi je pomerne málo s  im priamo úmerne st pa ich cena. Ďalšia otázka, ktor  sa po tomto prieskume naskytla, je schopnosť výrobcu dodať antény s tými vlastnosťami s akými dan  anténu popisuje. T to otázka účte bude spomenut  a objasnen  v d al ich kapitolách tejto práce.

4 Návrh, simulácia a optimalizácia antény

4.1 O programe CST Studio

CST Studio je simulačný program, ktorý slúži na simuláciu a teda aj analýzu rôznych elektromagnetických, vysokofrekvenčných ale aj optických štruktúr. CST Studio je dostupné vo viacerých verziách a to vo verzii zadarmo, a verzii platenej. Verzia, ktorá je zadarmo ponúka len základné možnosti návrhu a simulácie, taktiež poskytuje len obmedzenú presnosť celkovej analýzy, pretože obmedzuje celkový počet "mesh cell-ov". Platená verzia všetky tieto nevýhody odstraňuje a program je možné použiť úplne bez obmedzenia. CST Studio umožňuje vytvoriť 3D modely rôznych antén, filtrov, optických štruktúr, konektorov a mnoho ďalšieho. Modely je následne možné analyzovať, či už vo frekvenčnej, alebo časovej oblasti. Táto analýza je založená na simulačných algoritmoch v spomínanej časovej, alebo frekvenčnej oblasti. Samotná analýza modelu, alebo štruktúry prebieha tak, že model je diskretizovaný do podoby tzv. "mesh cells" a následne prebiehajú numerické výpočty na základe Maxwellových rovníc. Hustota a tvar jednotlivých buniek sa dá upravovať, s čím súvisí aj výšenie, resp. zníženie presnosti výsledného výpočtu a analýzy. Spomínané výpočty zabezpečujú tzv. "solvery". CST Studio ponúka viacero solverov, ktoré je potrebné vhodne zvoliť na základe navrhovaného modelu. Základné 2 typy solverov, ktoré sú veľmi používané, teda sú:

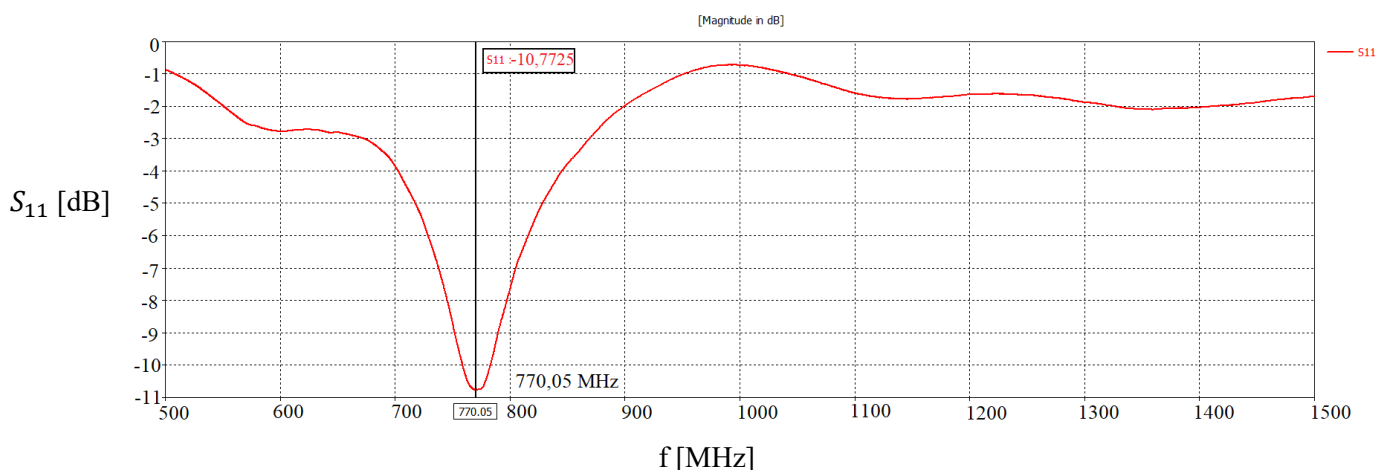
- Time Domain Solver – solver používaný na analýzu štruktúr v časovej oblasti. Výpočet funguje na základe FIT (Finite Integration Technique). Táto metóda je podobná metóde konečných diferencií, ale namiesto Maxwellových rovníc v diferenciálnom tvare sa používa tvar integrálny.
- Frequency Domain Solver – solver používaný vo frekvenčnej oblasti. Vhodný je najmä na analýzu úzkopásmových štruktúr ako sú napr. antény. [23]

4.2 Návrh antény

4.2.1 Skutočné vlastnosti antény

Z prieskumu trhu, ktorému som sa venoval v predchádzajúcej kapitole, vyplýva, že v súčasnej dobe je k dostaniu obrovské množstvo antén, ktoré sú hromadne vyrábané. Z tohoto dôvodu nie je rarita, keď dodaná anténa úplne nespĺňa vlastnosti, ktoré nám výrobca deklaruje. Preto môj návrh vychádza z tvaru hromadne vyrábanej antény "2JP0115P", ktorá je určená pre pásmo 868 MHz a dokáže teda spolupracovať s technológiou LoRaWAN. Vlastnosti tejto antény, ktoré deklaruje výrobca, v porovnaní s anténami, ktoré boli zahrnuté v prieskume sú relatívne zlé. Anténa síce operuje v požadovanom frekvenčnom pásme, ale jej hodnota VSWR sa pohybuje na hodnote až 3,0:1, priemerný zisk je nízky a efektívnosť sa pohybuje na hodnote 29%. Ako už bolo spomenuté, reálne vlastnosti dodanej antény nie vždy spĺňajú výrobcom deklarované vlastnosti. Dôkazom je teda aj samotná anténa z ktorej tvaru vychádza tento návrh. Ako je možno

vidieť na obrázku č. 4.1, z nameraných hodnôt je možné určiť, že reálne frekvenčné pásmo, na ktorom anténa operuje je posunuté o približne 100 MHz, čomu odpovedá stredová frekvencia 770 MHz. Parameter S_{11} nadobúda hodnotu -10,77 dB, čo je hodnota na hranici použiteľnosti. Z toho teda vyplýva, že anténa sa pre účel spolupráce s technológiou LoRaWAN vôbec nehodí, ba priam je až nemožná a preto je nutná optimalizácia a úprava antény. Aj napriek týmto faktom som tvar antény zvolil, a to hlavne pre jej veľkosť, ktorá sa ideálne hodí pre technológiu LoRaWAN. Avšak tento návrh nie je len kópia antény s už aj tak zlými vlastnosťami, ale ide o jej optimalizáciu na čo najlepšie vlastnosti a jej prispôbenie primárne pre technológiu LoRaWAN a teda spoluprácu a použitie v oblasti IoT s dôrazom na zníženie výrobných nákladov na minimum.



Obrázok 4.1: Namerané hodnoty S_{11} pôvodnej antény

4.2.2 Výber substrátu

Ako prvý krok pri návrhu antény bolo potrebné zvoliť vhodný substrát, preto bola voľba prvý nevyhnutý krok. Keďže navrhovaná anténa bude fungovať v pásme 868 MHz bol zvolený substrát FR-4. Tento substrát je síce nevhodný pre frekvencie vyššie ako 1 GHz, ale pre tento návrh, keďže pracovné pásmo antény je 868 MHz, vhodný je. Ďalšia nevýhoda tohoto substrátu je, že antény s týmto substrátom dosahujú relatívne nízky zisk a stratovosť substrátu je taktiež relatívne vysoká. Na druhú stranu, výhody zahŕňajú veľmi jednoduchú dostupnosť a veľmi nízku cenu. Konečné náklady na výrobu antény teda budú veľmi nízke. Konkrétne vlastnosti substrátu, ktorý bol použitý na návrh a následnú simuláciu a optimalizáciu teda sú:

- výška substrátu - 1,5 mm
- relatívna permitivita : 4,5

4.2.3 Napájanie antény

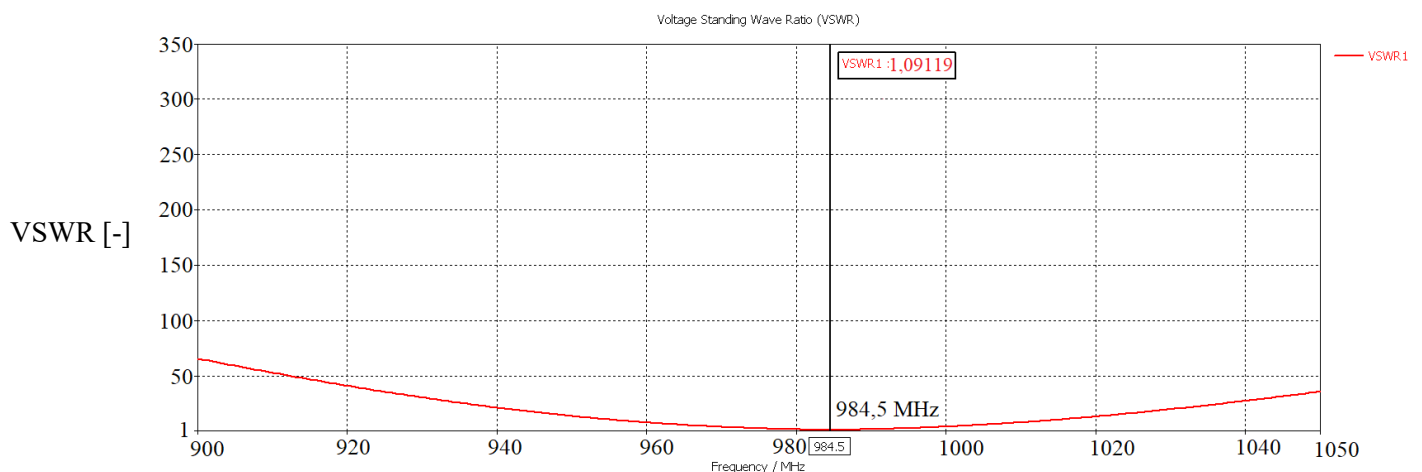
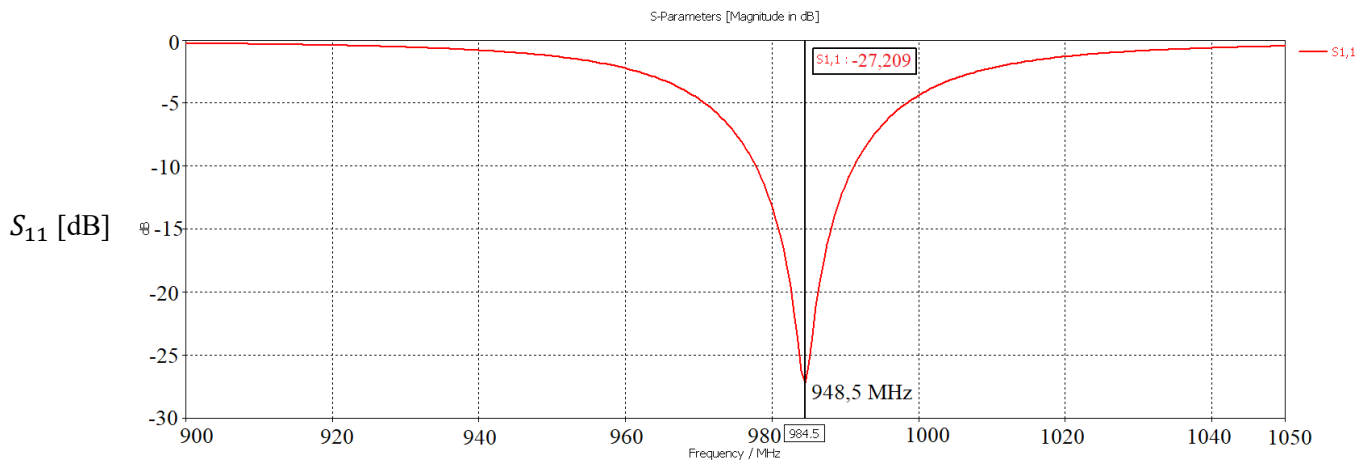
V predchádzajúcej kapitole 2.2 bolo spomenuté, že zo všetkých metód napájania plošnej antény sa v praxi využívajú 4 najobľúbenejšie. Tieto 4 metódy sú napájanie mikropásikovým vedením, napájanie koaxiálnou sondou, napájanie viazané apertúrou a budenie blízkym poľom. V prípade tohoto návrhu bola ako metóda napájania zvolená druhá možnosť a síce napájanie koaxiálnou sondou. Táto možnosť napájania má pre tento návrh hneď niekoľko výhod a to následná jednoduchosť pripojenia antény na anténny analyzátor, možnosť použitia viacerých druhov konektorov, prípadne možnosť jednoduchej úpravy napájacieho koaxiálneho kábla v prípade poruchy, alebo poškodenia, či už samotného kábla, alebo konektora. Možnosť napájania koaxiálnou sondou bude realizovaný mikrokoaxiálnym káblom o hrúbke 1,13 mm, ktorého vnútorný vodič bude napájkovaný v pravej vrchnej časti antény a vodičové opletenie koaxiálneho kábla bude pripojené na zemiacu plochu antény, ktorá sa nachádza v pravej spodnej časti antény. Konektor, ktorý bude slúžiť na pripojenie antény bol zvolený klasický konektor typu SMA male. Presný tvar a poloha bodov, kde bude kábel umiestnený bude znázornený v ďalších kapitolách.

4.3 Simulácia antény

Predtým ako samotná simulácia môže začať je potrebné vedieť, ktoré vlastnosti antény budú pre dobrý návrh kľúčové. Hlavné parametre, z ktorých sa je pri simulácii a následnej optimalizácii možné odraziť a usúdiť, či anténa je, alebo nie je dobre navrhnutá možno nájsť v zložke 1D Results - S-parameters a VSWR. Jednotlivé výsledky reprezentujú vstupný činiteľ odrazu a pomer stojatých vln. Hodnotu vstupného činiteľa odrazu je pre plošné antény, nutné znížiť pod hodnotu -10 dB. Čím je táto hodnota nižšia, tým je anténa lepšie prispôbená pre danú frekvenciu, resp. frekvenčné pásmo. Hodnotu VSWR je potrebné dostať čo najbližšie k hodnote 1. Tento parameter taktiež súvisí s impedančným prispôbením. Ďalší, taktiež dôležitý priečinok, na ktorý je potreba sa zamerať je priečinok Farfields. V tomto priečinku možno nájsť informácie o smerovosti, prípadne zisku antény, ktoré možno graficky zobrazit' a následne analyzovať.

Vlastnosti antény na substráte FR4 neboli známe, preto prvý krok pozostával zo simulácie neoptimalizovanej antény na novom substráte a síce na substráte FR-4. Pre celý priebeh simulácie bolo použité dostatočné množstvo "mesh cell-ov" pre veľmi presnú, no zároveň časovo nie veľmi náročnú simuláciu. V prvom kroku simulácie ostal tvar antény nezmenený, pretože jeho cieľom bolo zistiť vlastnosti antény na novom substráte. Tvar a rozmery neoptimalizovanej antény je možno vidieť na obrázku č. 4.2. Z obrázku vyplýva že, anténa je tvorená menšími časťami, ktoré dokopy vytvárajú finálny tvar a konečné rozmery plošnej antény. Pre jednoduchosť popisu a následnú prehľadnosť optimalizácie sú jednotlivé časti označené písmenami a - g. Jednotlivé medené "cesty" sa nachádzajú na vrchnej časti substrátu a teda vytvárajú konečný tvar antény, ich hrúbka je 0,035 mm.

Z výsledku simulácie na obrázku č. 4.3 je na prvý pohľad zrejmé, že hodnota parametru S_{11} je relatívne nízka a v minime dosahuje -27,2 dB. Hodnota VSWR, ako je možné vidieť na obrázku č. 4.4, taktiež dosahuje veľmi dobré hodnoty, ale bez optimalizácie na účel spolupráce s technológiou LoRaWAN anténa nie je vhodná z dôvodu nezhody frekvenčného pásma antény s pásmom 868 MHz a preto je optimalizácia antény nevyhnutná.



Obrázok 4.4: Nasimulovaná hodnota $VSWR$ neoptimalizovanej antény

Po výsledku simulácie, ktorá priblížila vlastnosti antény na novom substráte a vyhodnoteniu, že anténa sa v danom stave na spoluprácu s technológiou LoRaWAN nedá použiť, je možné pristúpiť k optimalizácii. Keďže v dostupnej literatúre neexistuje presný vzorec, alebo návod, ktorý by popisoval výpočet tvaru antény tohoto typu, prvý krok samotnej optimalizácie spočíval v zistení, ako jednotlivé časti antény (a–g) ovplyvňujú jej konečné vlastnosti, teda inými slovami, simulácia je jediný spôsob ako zistiť vlastnosti antény aj po následnej úprave jednotlivých častí. Po dokončení určitého väčšieho počtu simulácií bolo zistené, že každá časť antény ovplyvňuje konečné vlastnosti určitým špecifickým spôsobom. Niektoré časti primárne ovplyvňovali šírku pásma antény, bez viditeľnej zmeny iných parametrov, niektoré mali za následok pokles, či vzostup hodnoty parametru S_{11} , iné zase ovplyvňovali stredovú frekvenciu pásma antény a mali za následok jej posun.

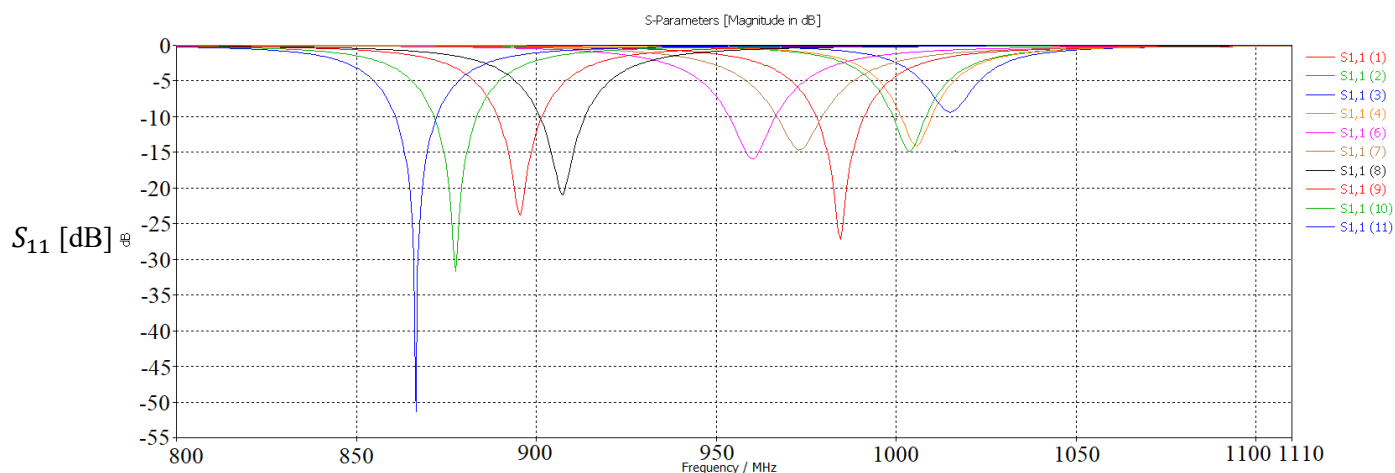
4.4 Optimalizácia antény

Ako je zrejmé z predchádzajúcej kapitoly neoptimalizovaná anténa rezonuje na frekvencii približne 984,5 MHz a preto nie je použiteľná pre pásmo 868 MHz. Prvý krok v optimalizácii antény spočíva v "posunutí" rezonančnej frekvencie na nižšie hodnoty, ideálne do stredú pásma 868 MHz, čomu zodpovedá stredová frekvencia 866,5 MHz, následne je potreba znížiť hodnotu S_{11} . Optimalizáciu antény a zmenu terajších vlastností je možné dosiahnuť úpravou jej tvaru, konkrétne úpravou jednotlivých častí, ktoré sú zobrazené na obrázku č. 4.2. Optimalizáciou sa podarilo navrhnuť 2 funkčné modely, ktoré spĺňajú vyššie uvedené požiadavky. Popis optimalizácie bude popísaný v nasledujúcich podkapitolách. Pri oboch modeloch bol prvotný krok rovnaký, a síce bolo potrebné nastaviť rozsah frekvencií, medzi ktorými bude simulácia prebiehať v tomto prípade bol zvolený rozsah 800–1200 MHz. Toto umožňuje sledovať, vlastnosti antény vo veľkom frekvenčnom rozsahu a mať tak prehľad o vlastnostiach antény v širokom frekvenčnom rozpätí, avšak výsledné hodnoty nebudú príliš presné, preto v momente, kedy má anténa nami požadované vlastnosti, je dobré rozsah frekvencií pre simuláciu znížiť približne na požadované pásmo antény a vlastnosti antény doladiť. Znížením rozsahu sa zabezpečí zvýšenie presnosti simulácie priamo na nami požadované pásmo.

4.4.1 Model č. 1

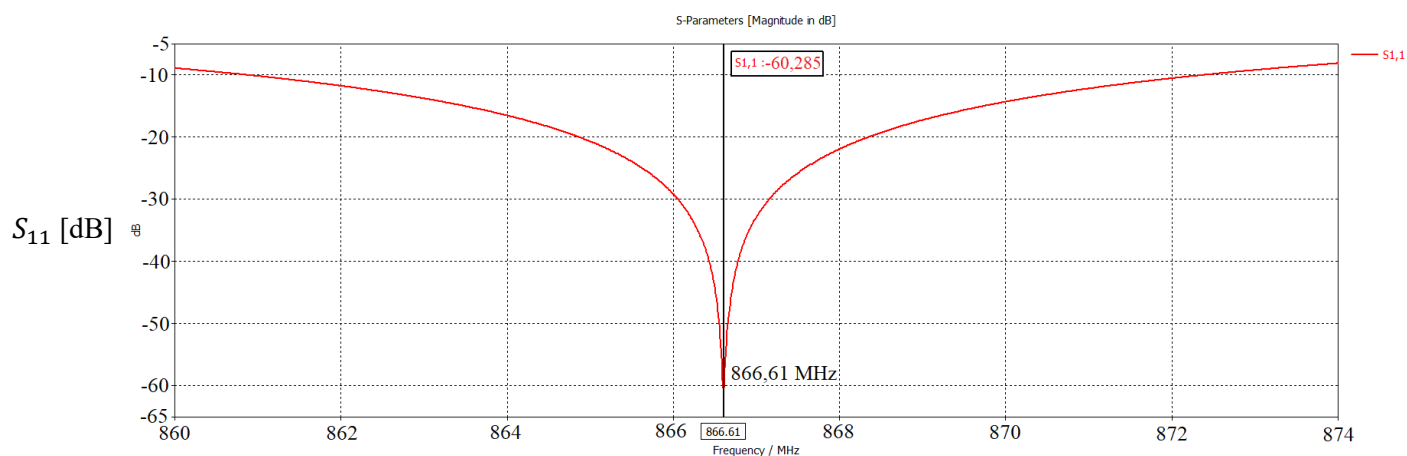
Cieľ celkovej optimalizácie je teda zmena rezonančnej frekvencie antény na 866,6 MHz a čo najnižšia hodnota S_{11} , s podmienkou, že v celom frekvenčnom pásme antény (863–870 MHz) bude hodnota S_{11} dosahovať najviac -10 dB. Postupnou úpravou anténnych častí d–g sa táto optimalizácia podarila. Na obrázku č. 4.5 je vidieť, ako jednotlivé zmeny a úpravy rozmerov častí d–g mali vplyv na hodnotu S_{11} a následne tak aj na VSWR. Prvá zmena sa týkala časti "g", ktorá nemala priaznivý vplyv na posun stredovej frekvencie, no na druhú stranu došlo k rozšíreniu pásma antény. Hlavný podiel na zmene, alebo posunutí stredovej frekvencie antény mali časti s označením "d, e, f", konkrétne časť "d" a jej rozšírenie mali za následok posun frekvencie

do nižších hodnôt a zároveň zníženie hodnoty S_{11} , no však vplyv zmeny bol relatívne malý a bolo potrebné v optimalizácii pokračovať. Nasledovala úprava rozmerov časti "e". Zúženie tejto časti taktiež priaznivo ovplyvnilo posun frekvencie k nami požadovanej hodnote, avšak mala aj nepriaznivý následok, a síce zvýšenie hodnoty S_{11} . Časť "f" a taktiež úprava jej šírky mala veľmi priaznivý vplyv na celkovú optimalizáciu. Touto úpravou sa podarila významná zmena hodnoty S_{11} , ktorá klesla na hodnotu menšiu ako -50 dB a došlo k posunu rezonančnej frekvencie na požadovanú.

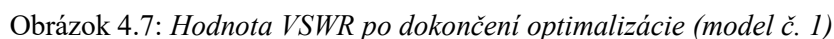


Obrázok 4.5: Zmena hodnoty S_{11} v závislosti na zmene rozmerov (model č. 1)

Následne bolo možné znížiť frekvenčný rozsah simulácie. Nový rozsah bol zvolený vzhľadom k šírke pásma 868 MHz, čo predstavuje 7 MHz, čiže nový rozsah bol nastavený na 860–874 MHz. Toto malo za následok zvýšenie presnosti simulácie a miernu úpravu vlastností antény. Ako je možné vidieť na obrázku č. 4.6, došlo k miernemu spresneniu a úprave hodnoty S_{11} , ktorá po dokončení optimalizácie dosahuje v strede pásma 868 MHz hodnotu -60,3 dB, čo je veľmi dobrá hodnota. V krajných bodoch pásma, čiže na 863 MHz a 870 MHz sa hodnota S_{11} pohybuje pod -14 dB. V celom pásme hodnota S_{11} nadobúda maximálne -14 dB.

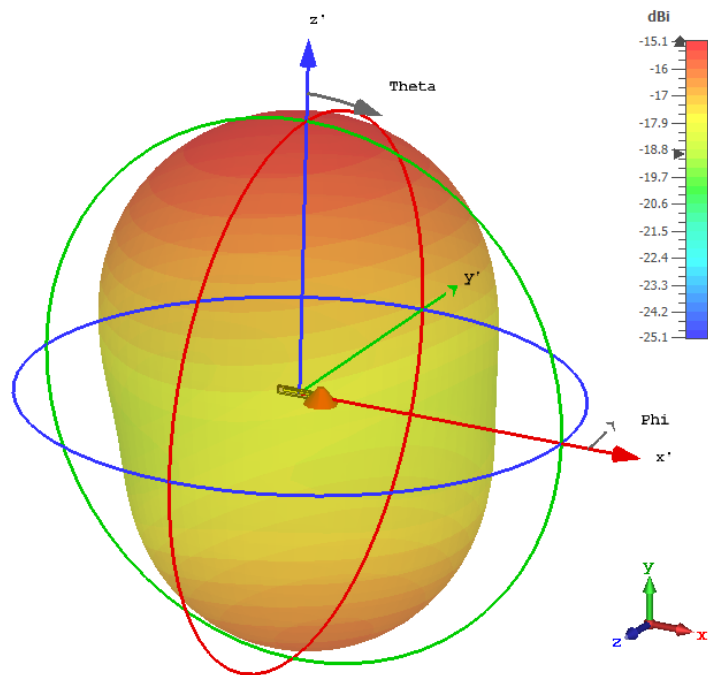


Obrázok 4.6: Hodnota S_{11} po dokončení optimalizácie (model č. 1)



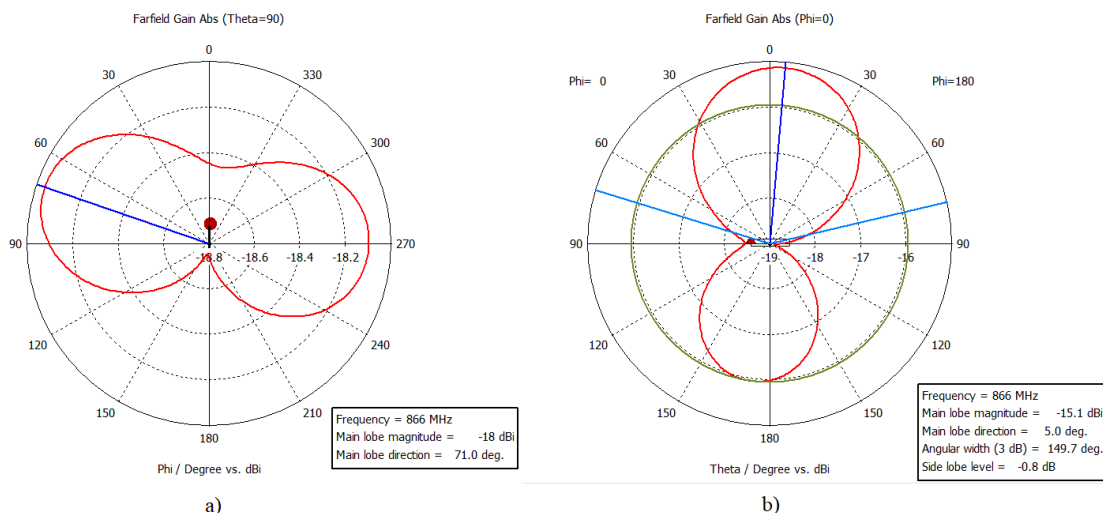
Obrázok 4.8: Rozmery optimalizovanej antény (model č. 1)

Ďalšia, nemenej dôležitá vlastnosť, ktorú je potrebné spomenúť je zisk antény. Spomínaný zisk, ale aj vyžarovacie diagramy je možné nájsť v zložke "Farfields". Monitor bol v tomto prípade nastavený na statickú hodnotu, a síce na frekvenciu 866 MHz. Z 3D náhľadu vyžarovacieho diagramu, ktorý je možno vidieť na obrázku č. 4.9, vyplýva, že anténa sa správa všesmerovo, avšak hlavný smer vyžarovania možno pozorovať v oblasti nad a pod anténou.



Obrázok 4.9: 3D vyžarovací diagram (model č. 1)

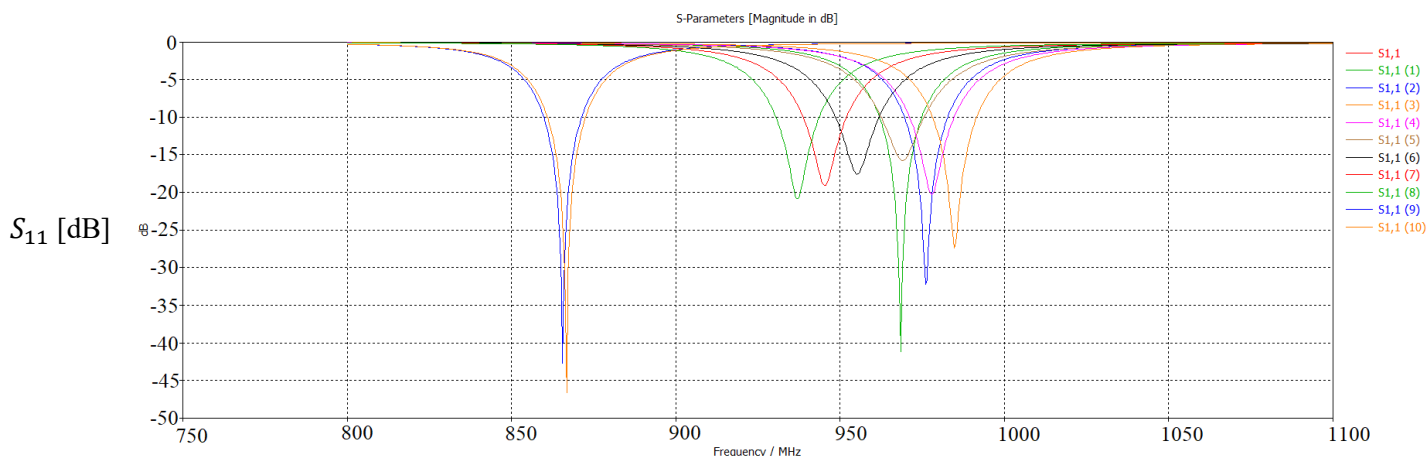
V prípade vertikálnej smerovej charakteristiky, maximálna hodnota zisku dosahuje hodnotu -18 dBi a v prípade horizontálnej smerovej charakteristiky je táto hodnota o niečo vyššia, a sice -15,1 dBi, šírka hlavného laloku v tomto prípade dosahuje 149,7°. Hodnoty zisku sú už na prvý pohľad relatívne malé. Nízke hodnoty sú spôsobené veľkosťou antény, ktorá dosahuje malých rozmerov a taktiež samotným použitým substrátom. Avšak anténa je určená pre spoluprácu s technológiou LoRaWan, ktorá sa vyznačuje veľmi veľkou citlivosťou (až -142,5 dB), preto je anténa použiteľná i s relatívne malým ziskom.



Obrázok 4.10: Smerová charakteristika a) vertikálna, b) horizontálna (model č. 1)

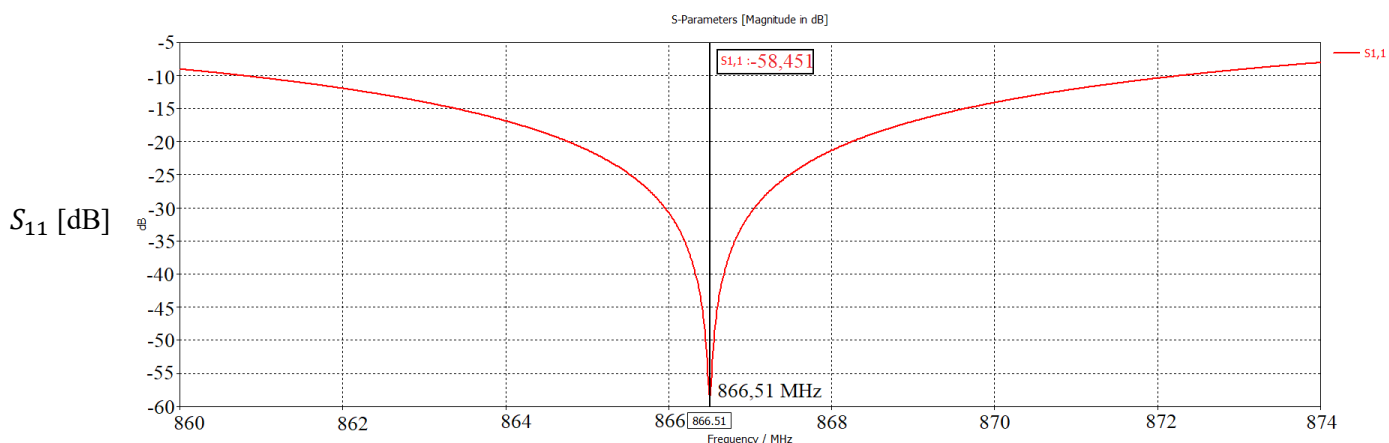
4.4.2 Model č. 2

Cieľ optimalizácie popísaný pri predchádzajúcom modeli ostáva nezmenený. Je teda potrebné docieľiť posun rezonančnej frekvencie na stred pásma 868 MHz a síce na frekvenciu 866,6 MHz a znížiť hodnotu S_{11} na čo najnižšiu možnú. Optimalizácia prebiehala obdobným spôsobom ako pri predchádzajúcej kapitole. Postupnou úpravou jednotlivých častí sa podaril vytvoriť ďalší model antény s podobnými vlastnosťami, avšak s inými rozmermi. Na obrázku č. 4.10 je možné vidieť postupný priebeh optimalizácie a jednotlivé zmeny hodnoty S_{11} .

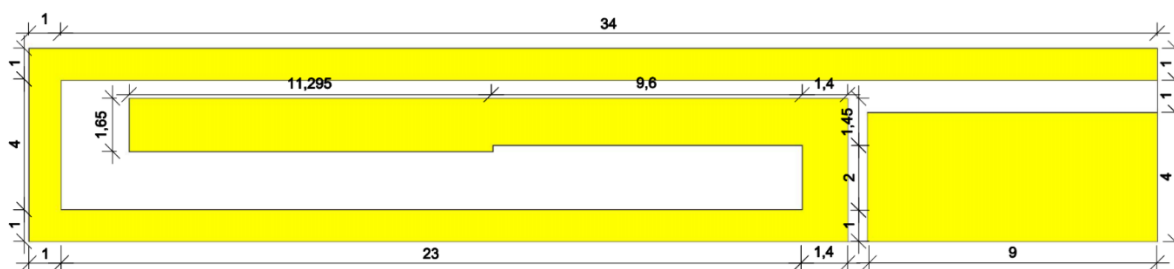


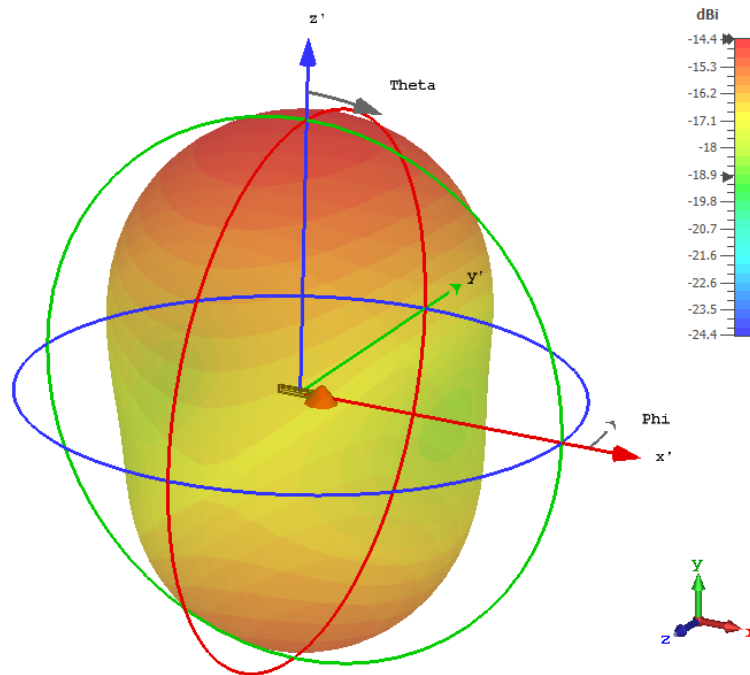
Obrázok 4.11: Zmena hodnoty S_{11} v závislosti na zmene rozmerov (model č. 2)

Ako je možno vidieť z obrázku, hodnotu S_{11} sa podarilo dostať na hodnotu -45 dB. Následným znížením frekvenčného rozsahu dochádza k miernej úprave vďaka zvýšeniu presnosti. Konečná hodnota S_{11} , ako je možné vidieť z obrázka č. 4.12, je teda -58,45 dB, čo je v porovnaní s modelom č. 1 veľmi mierne horšia hodnota, avšak v konečnom dôsledku stále veľmi dobrá. Hodnota S_{11} , tak ako pri predchádzajúcom modeli, sa v krajných bodoch pásma 863 MHz a 870 MHz pohybuje opäť pod -14 dB.



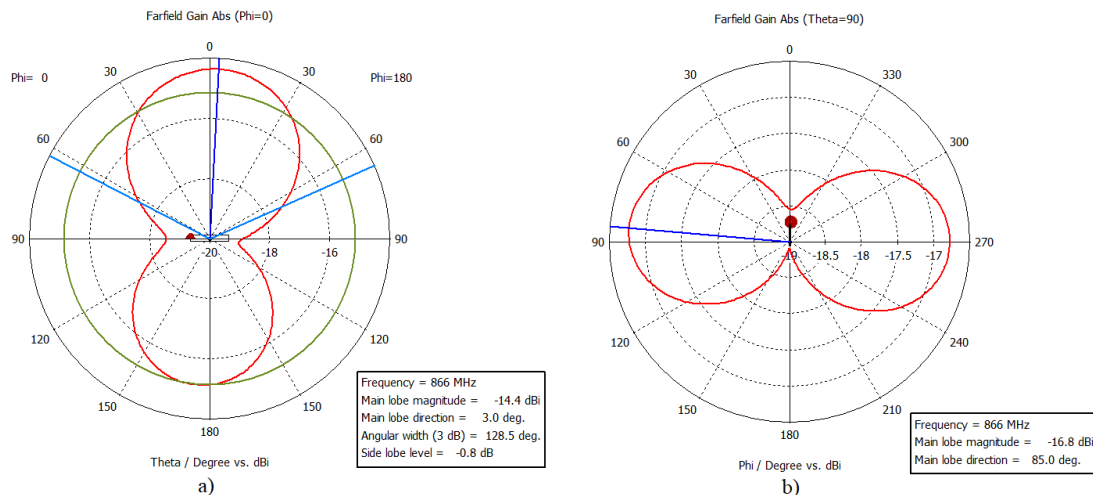
Obrázok 4.12: Hodnota S_{11} po dokončení optimalizácie (model č. 2)





Obrázok 4.15: 3D vyžarovací diagram (model č. 2)

V prípade smerovej vertikálnej charakteristiky sa maximálna hodnota zisku pohybuje na hodnote -16,8 dBi, naopak v prípade horizontálnej smerovej charakteristiky je táto hodnota o niečo nižšia, a síce -16,8 dB, šírka hlavného laloku v tomto prípade dosahuje 128,5°. Z diagramov vyplýva, že oproti predchádzajúcemu návrhu došlo k miernemu zlepšeniu hodnoty zisku, avšak aj v tomto prípade je jeho hodnota relatívne malá, čo je opäť spôsobené malými rozmermi antény a použitým substrátom.



Obrázok 4.16: Smerová charakteristika a) horizontálna, b) vertikálna

4.4.3 Simulácia na substráte ASTRA MT77

Ako doplnujúci krok k predchádzajúcemu návrhu, bola simulácia a optimalizácia antény na substráte ASTRA MT77. Tento substrát sa oproti substrátu FR4 vyznačuje menšou stratovosťou, nižšou relatívnou permitivitou, ktorá dosahuje hodnoty 3, ale naopak omnoho vyššou cenou. Obdobným spôsobom, ako pri predchádzajúcich modeloch sa rezonančnú frekvenciu antény podarilo optimalizovať na stred pásma 868 MHz. Hodnota parametru S_{11} dosahovala v minime hodnotu -29,76 dB, čo je v porovnaní s predchádzajúcimi modelmi, približne o polovicu menej a anténa pôsobila oveľa úzkopásmovejšie. Na druhú stranu hodnota zisku zaznamenala navýšenie a dosahovala približne -8 dBi. 3D vyžarovací diagram je v porovnaní s modelmi 1 a 2 nezmenený. Lepšiu hodnotu zisku, prípadne zníženie minima hodnoty S_{11} by bolo možné dosiahnuť zvýšením rozmerov antény. Na druhú stranu, razantne by sa tak zvýšila cena realizácie.

5 Praktická realizácia antény

Posledná kapitola tejto práce je venovaná práve výrobe a následnému overeniu správnosti výroby meraním.

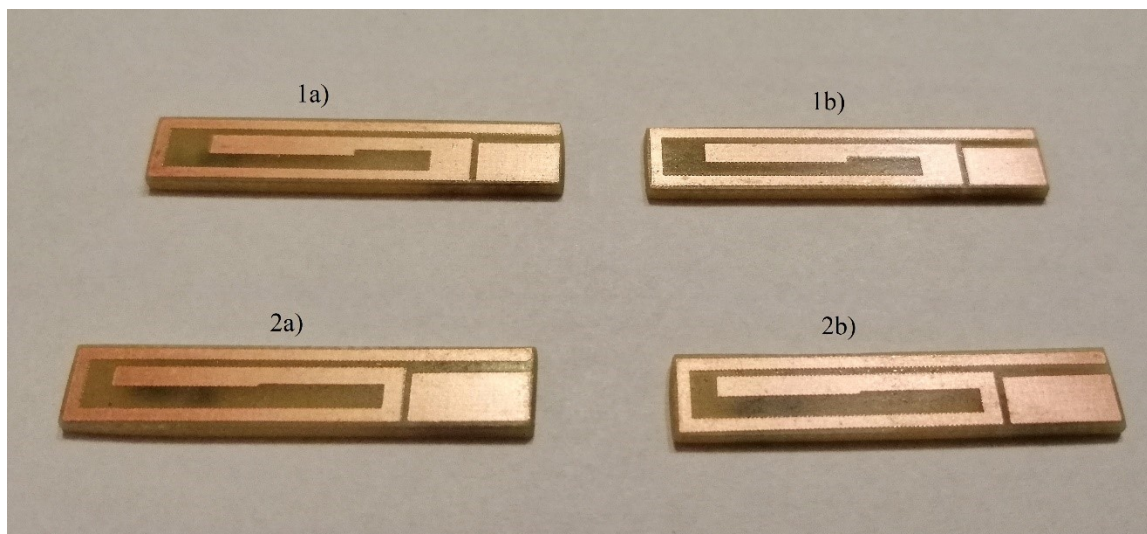
5.1 Výroba antény

Po dokončení a doladení antény v simulačnom programe CST Studio bolo možné pristúpiť k samotnej výrobe antény. Z dôvodu, že sa jedná o anténu relatívne malých rozmerov bola pre výrobu zvolená forma fotocesty. Tento spôsob výroby sa radí medzi najpoužívanejšie a zároveň najpresnejšie metódy výroby plošných antén. Prvý krok pri použití metódy fotocesty spočíva v príprave tzv. masky. Masku je možné vytlačiť bežnou laserovou tlačiarňou, zvyčajne na priesvitnú fóliu. Tento krok kladie dôraz hlavne na ostré a kontrastné okraje vytlačenej masky. Ďalší krok zahŕňa osvetlenie masky na fotocitlivú vrstvu, ktorá sa nachádza na doske. Táto maska zároveň slúži ako ochrana pri odleptávaní nepotrebných vodivej vrstvy, čo je ďalším krokom pri použití fotocesty. Celý proces kladie dôraz na zvýšenú opatrnosť a použitie ochranných pomôcok, pretože leptacie roztoky môžu spôsobiť vážne, dokonca i trvalé zranenia.

Formou fotocesty boli vyrobené 4 kusy antén z toho dva kusy modelu číslo 1 a dva kusy modelu číslo 2. Tieto 4 kusy boli vyleptané na dosičku o rozmeroch približne 35x30 mm. Keďže sa antény nachádzali na jednej dosičke bolo ich potrebné oddeliť. Po odrezaní sa na anténach nachádzal presahujúci substrát, ktorý bolo potrebné odstrániť jednoduchým zbrúsením. Stav antény pred opracovaním možno pozorovať na obrázku č. 5.1, následný stav všetkých antén, už po finálnom opracovaní a označení si možno všimnúť na obrázku č. 5.2.



Obrázok 5.1: Stav antény pred opracovaním



Obrázok 5.2: Stav všetkých antén po opracovaní

V momente opracovania všetkých antén bolo možné pristúpiť k napájaniu koaxiálneho napájacieho kábla, tak ako to bolo popísané v predchádzajúcich kapitolách, a síce vnútorný vodič pripojiť k pravej hornej časti antény a vodivé opletenie zase na uzemňovaciu plochu, ktorá sa nachádza v pravej spodnej časti antén. Tento stav je možné pozorovať na obrázku č. 5.3. Ako koaxiálny kábel (1,13 mm) bol použitý pigtail s konektorom SMA.



Obrázok 5.3: Napájkovaný pigtail s konektorom SMA

5.2 Overenie správnosti výroby meraním a následná optimalizácia

V momente, kedy všetky antény mali pripravené napájanie bolo možné pristúpiť k overeniu správnosti výroby meraním. Meranie hodnoty S_{11} a PSV prebiehalo v laboratóriu vektorovým analyzátorom ZDN značky Rohde&Schwarz, ktorý je určený pre rozsah 100 kHz - 4,5 GHz. Po pripojení antén na vektorový analyzátor bolo zrejme, že antény budú potrebovať optimalizáciu aj po samotnej výrobe z dôvodu, že parameter S_{11} dosahoval svoje minimum v nižších frekvenciách ako bolo potrebné. Tento posun minima hodnoty S_{11} mohli spôsobiť viaceré faktory. Prvý a zároveň najpravdepodobnejší faktor je pridanie samotného cínu, ktorý bol potrebný pre napájkovanie koaxiálneho kábla a tento cín nebol zohľadnený v predchádzajúcej simulácii. Ďalší faktor, ktorý mohol ovplyvniť tento posun je nepresnosť pri výrobe a nedostatočné zamaskovanie častí antén. Po zohľadnení týchto skutočností bolo možné pristúpiť ku konečnej optimalizácii už vyrobených antén. Po overení simuláciou, spôsob akým bolo možné docieľiť posun minima S_{11} na požadovanú frekvenciu, spočíval v skrátení vnútorného ramena všetkých antén. Pri modeloch 1a, 1b bolo potrebné skrátiť spomínané vnútorné rameno o 3 mm. Pri modeloch 2a, 2b bolo potrebné skracovať o niečo menej, a síce o 2,5 mm.

5.3 Výsledky merania

Po dokončení optimalizácie vyrobených antén ostával už len posledný krok, a síce overenie vlastností optimalizovaných antén. Meranie vlastností prebiehalo obdobne ako v predchádzajúcej kapitole, namerané hodnoty, spolu so simulovanými je možné sledovať v tabuľke č. 5.1.

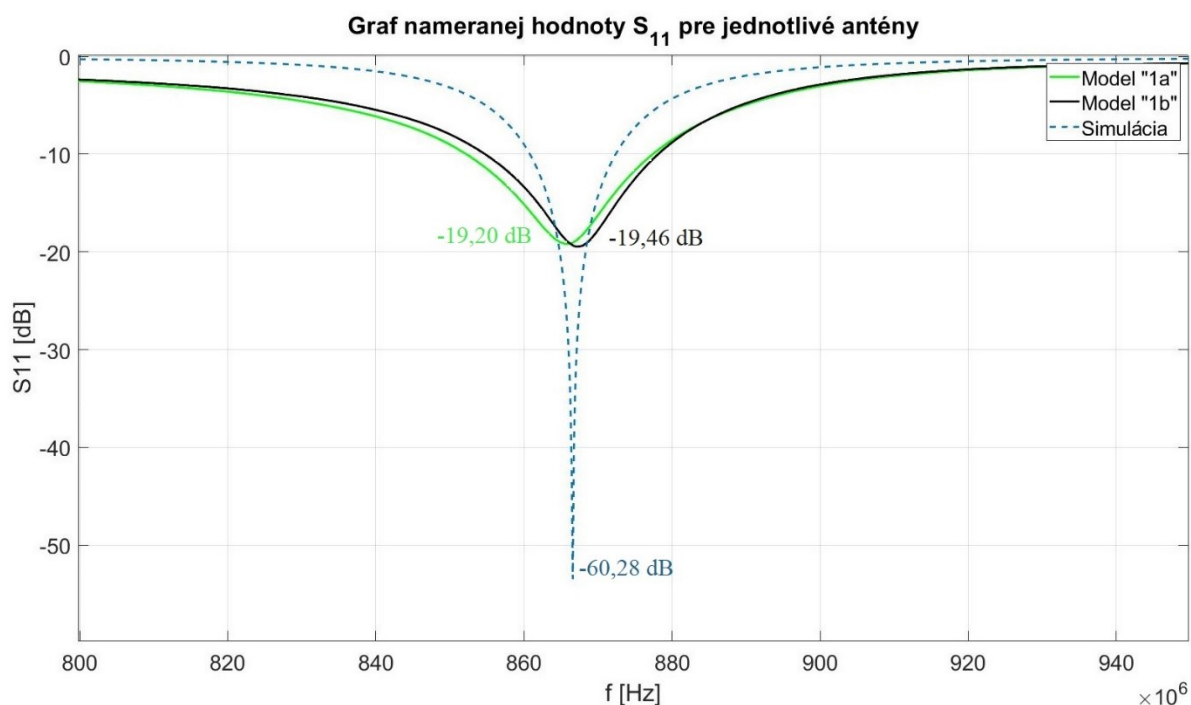
Tabuľka 5.1: Namerané hodnoty S_{11} a PSV jednotlivých modelov antén

Model	1a	1b	2a	2b
S_{11} [dB] - simulácia	-60,28	-60,28	-58,45	-58,45
S_{11} [dB] - simulácia 863 MHz	-13,83	-13,83	-14,03	-14,03
S_{11} [dB] - simulácia 870 MHz	-14,36	-14,36	-14,14	-14,14
S_{11} [dB]	-19,20	-19,46	-46,99	-34,07
S_{11} [dB] - 863 MHz	-17,92	-16,28	-21,83	-21,53
S_{11} [dB] - 870 MHz	-16,19	-17,72	-20,78	-20,50
PSV [-] - simulácia	1 : 1,00	1 : 1,00	1 : 1,00	1 : 1,00
PSV [-] - simulácia 863 MHz	1 : 1,51	1 : 1,51	1 : 1,49	1 : 1,49
PSV [-] - simulácia 870 MHz	1 : 1,47	1 : 1,47	1 : 1,48	1 : 1,48
PSV [-]	1 : 1,40	1 : 1,65	1 : 1,07	1 : 1,02
PSV [-] - 863 MHz	1 : 1,63	1 : 1,67	1 : 1,10	1 : 1,24
PSV [-] - 870 MHz	1 : 1,40	1 : 1,89	1 : 1,33	1 : 1,15

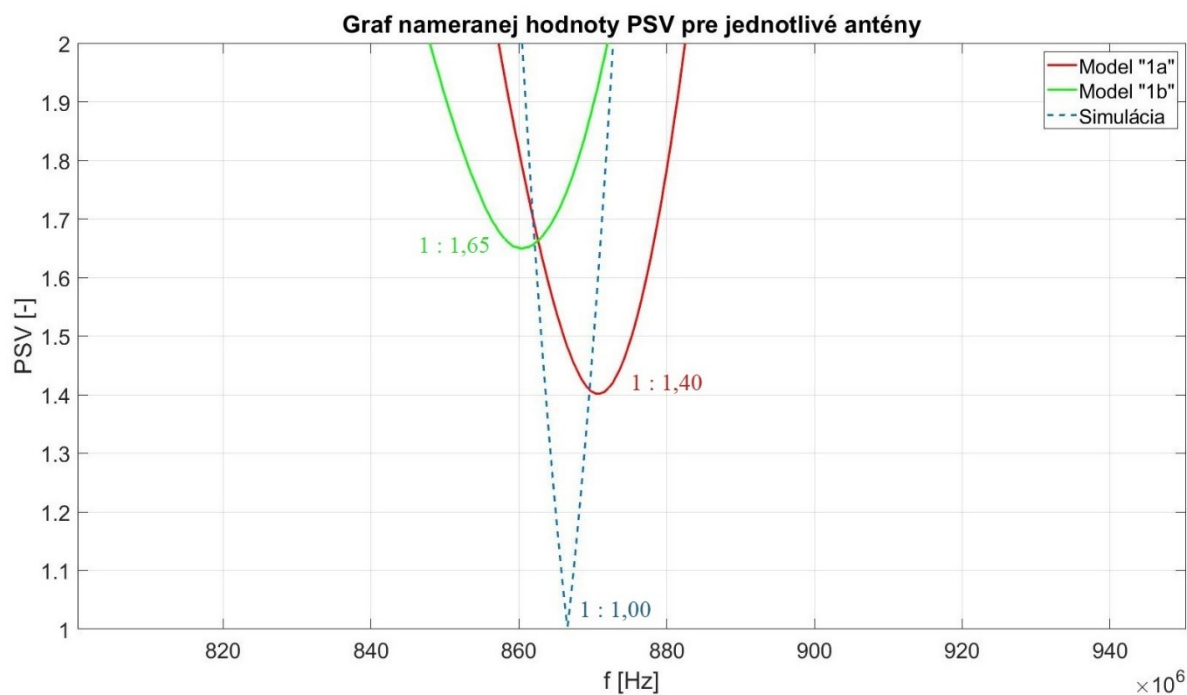
Z výsledkov merania vyplýva, že namerané hodnoty sa odlišujú od tých nasimulovaných. Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, je množstvo faktorov, ktoré tieto odlišnosti spôsobujú. Jednak to môže byť použitý cín, ktorý nebol zahrnutý do návrhu, alebo nepresnosti spôsobené pri samotnej výrobe. Odlišnosti sa prejavujú najmä v krajných

a stredných hodnotách pásma. Pri modeli číslo 1, oproti nasimulovanej hodnote dochádza k viditeľnému zvýšeniu hodnoty parametru S_{11} , naopak v krajných bodoch pásma je hodnota nižšia ako v simulácii, čo ma za následok, že anténa je v skutočnosti širokopásmovejšia ako tomu bolo pri simulácii. Model číslo 2 vykazuje podobné zmeny, avšak rozdiely nameraných a nasimulovaných hodnôt v strede pásma nie sú také výrazné, naopak v krajných bodoch dochádza k výraznému poklesu hodnoty S_{11} , čo opäť robí anténu širokopásmovejšiu. V prípade PSV sú hodnoty prvého modelu oproti simulovaným mierne horšie, avšak model číslo 2 vykazuje v porovnaní s nasimulovanými viditeľné zmeny k lepšiemu.

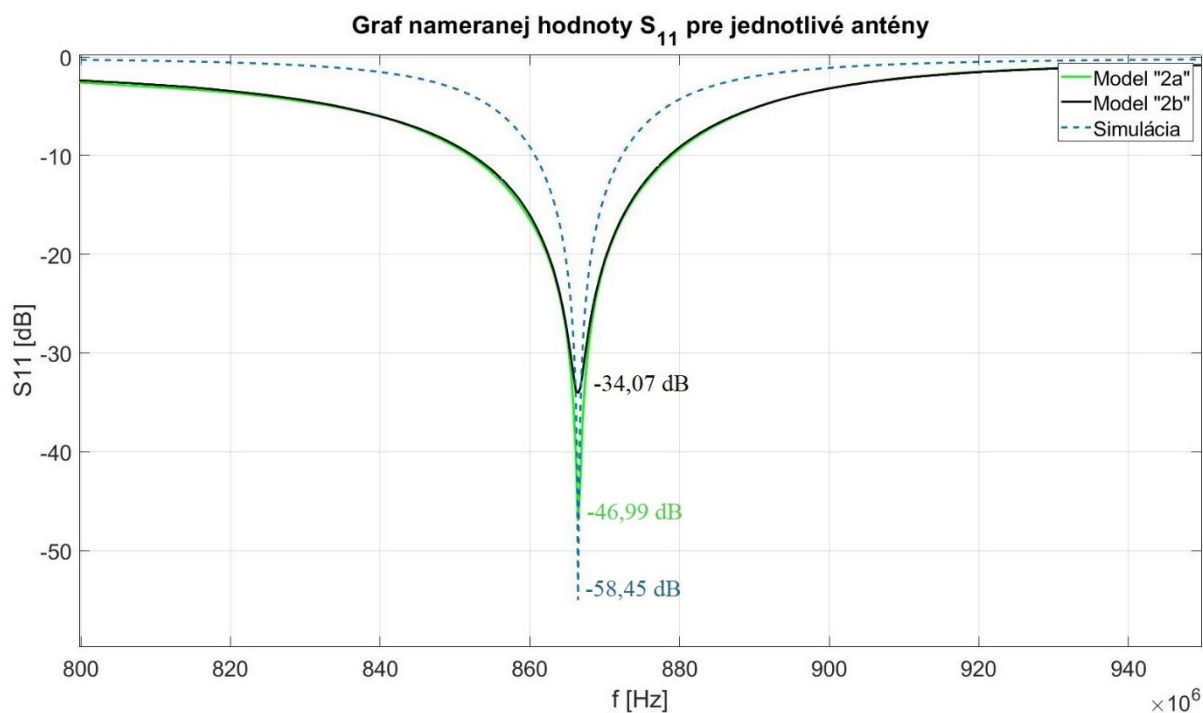
Pre lepšiu názornosť a jednoduchšie porovnanie nameraných a odsimulovaných hodnôt sú tieto hodnoty zobrazené i v grafoch na obrázkoch č. 5.4 - č. 5.7. Výsledky simulácie sú v grafoch zobrazené čiarkovane, namerané hodnoty naopak plnou čiarou.



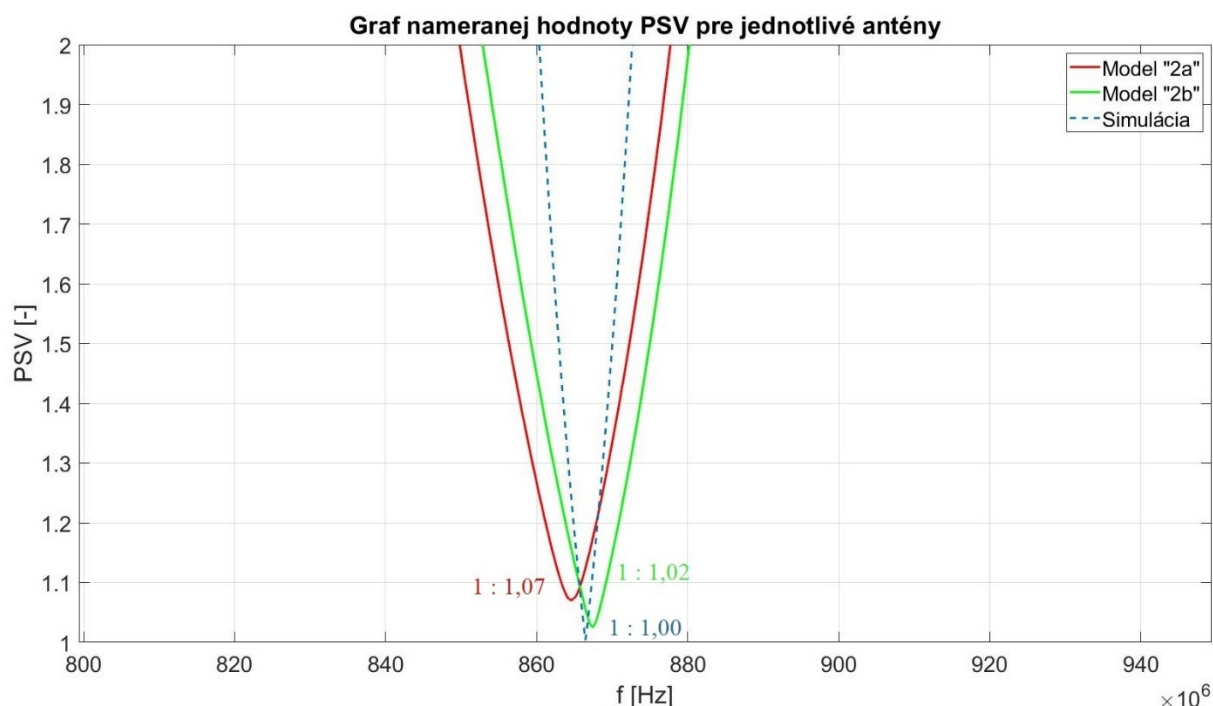
Obrázok 5.4: Výsledky merania parametra S_{11} – model 1a, 1b



Obrázok 5.5: Výsledky merania PSV – model 1a, 1b



Obrázok 5.6: Výsledky merania parametra S_{11} – model 2a, 2b



Obrázok 5.7: Výsledky merania PSV – model 2a, 2b

Posledný krok pri meraní parametrov antén zahŕňal meranie zisku. Toto meranie prebehlo tzv. porovnávacou metódou, ktorá spočíva v použití dvoch rovnakých referenčných antén a následného zamenenia jednej z nich za anténu neznámu. Pre meranie bol použitý vektorový analyzátor ZDN značky Rohde&Schwarz. Namerané hodnoty zisku sa už na prvý pohľad razantne líšili od tých nasimulovaných. V prípade všetkých modelov došlo k výraznému zvýšeniu oproti nasimulovaným hodnotám. Modely 1a, 1b zaznamenali zvýšenie hodnoty zisku skoro o 7 dB, čo nie je zanedbateľná hodnota. Konkrétna hodnota, ktorá bola nameraná pre model 1a je -8,17 dB. Pri modeli 1b je táto hodnota o niečo nižšia a pohybuje sa na -8,45 dB. Model 2a je z pomedzi všetkých antén v tomto prípade najhorší a hodnota zisku sa pohybuje na -11,46 dB, avšak stále je tu prítomné zlepšenie oproti nasimulovanej hodnote. Posledný model 2b, naopak vykazuje najvýraznejšie zlepšenie oproti nasimulovaným hodnotám. V prípade tohoto modelu sa hodnota zisku pohybuje na -6,54 dB, čo je oproti simulácií rozdiel skoro až 8 dB. Pre lepšiu prehľadnosť sú hodnoty zisku taktiež zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 5.2: *Namerané hodnoty zisku pre jednotlivé modely antény*

Model	1a	2a	1b	2b
Zisk – simulácia [dBi]	-15,1	-15,1	-14,4	-14,4
Zisk – nameraný [dBi]	-8,17	-11,46	-8,45	-6,54

Fotodokumentácia priebehu merania zisku je súčasťou tlačenej prílohy.

6 Záver

Prvá kapitola tejto práce je venovaná všeobecnému popisu antén so zameraním primárne na ich vlastnosti. Táto kapitola slúži ako stručný úvod do problematiky antén vo všeobecnosti. Taktiež popisuje najdôležitejšie vlastnosti antén a vysvetľuje niektoré dôležité vybrané matematické vzťahy, ktoré budú v ďalších kapitolách slúžiť na porovnanie jednotlivých antén.

Nasledujúca kapitola je opäť venovaná teoretickej rovine, avšak tento raz plošných antén. Táto kapitola slúži ako úvod do tejto konkrétnej problematiky, kde popisujem použitie týchto antén, spôsob ich konštrukcie, formy napájania, alebo spôsob ich analýzy, prípadne výhody, či nevýhody. V tejto časti sú taktiež objasnené niektoré dôležité matematické vzťahy, ktoré sú úzko späté s problematikou plošných antén.

Cieľ nasledujúcej kapitoly je popísať rôzne komerčne dostupné antény, ktoré sú použiteľné na strane senzoru a dokážu spolupracovať s technológiou LoRaWan. Konkrétne sa venuje deviatim anténam rôzneho druhu a konštrukcie, ktorých pracovné frekvenčné pásmo obsahuje aj pásmo 868 MHz. Tieto antény medzi sebou porovnávam a popisujem (ne)schopnosť použitia pre daný účel. Kapitola je zakončená mojim názorom na dostupnosť antén a výberom, z môjho pohľadu, najlepšej zo všetkých spomenutých antén.

Ďalšia kapitola sa venuje hlavnej náplni tejto práce, a síce návrhu plošnej antény pre technológiu LoRaWan. Tvar tejto antény vychádza z komerčne dostupnej antény, ktorej vlastnosti sa nezhodovali s vlastnosťami deklarovanými výrobcou. V tomto návrhu došlo k zmene substrátu na substrát FR4 a následnej optimalizácii na čo najlepšie vlastnosti. V tejto kapitole taktiež bližšie popisujem dôvody, prečo som volil práve túto anténu. Kapitola rovnako zahŕňa popis postupu návrhu, optimalizácie a následné výsledky optimalizácie. Konečný výsledok tejto kapitoly sú dva plne optimalizované modely, ktoré sú precízne doladené na stred požadovaného pásma 868 MHz. Ako dodatok je taktiež spomenutá simulácia na substráte ASTRA MT77, ktorý sa vyznačuje výrazne vyššou cenou ako pri substráte FR4.

Posledná a teda záverečná kapitola popisuje reálnu výrobu antén. Samotná výroba prebehla formou fotocesty, ktorá je v tejto kapitole popísaná. Po úspešnej výrobe sa v kapitole venujem napájkovaniu konektoru a následnej optimalizácii už vyrobených antén, popisujem postup a dôvod tejto optimalizácie. Nasleduje úsek venovaný meraniu parametrov a následnému vyhodnoteniu merania s porovnaním nasimulovaných a odmeraných hodnôt. Toto porovnanie je znázornené v tabuľke a grafoch. Nasleduje popis merania zisku, ktorý bol meraný porovnávacou metódou a kapitola je zakončená porovnaním nasimulovaných a reálnych hodnôt, kedy reálna hodnota zisku vysoko prevýšila hodnotu nasimulovanú.

Všetky vyrobené antény sú plne schopné použitia v rámci technológie LoRaWan, prípadne v pásme 868 MHz. Všetky podstatné grafy a fotodokumentácie sú súčasťou tlačenej prílohy.

7 Použitá literatura

- [1] BALANIS, Constantine A. Antenna theory: analysis and design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 9780471667827.
- [2] BALANIS, Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th Edition. John Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-64206-1.
- [3] MACOUN, Jindra. Směrovost a zisk antén(2) [online]. In: . [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [http://www.crk.cz/FILES/VR-ANT/40.%20Sm%C4%9Brovost%20a%20zisk%20ant%C3%A9n%20\(2\).pdf](http://www.crk.cz/FILES/VR-ANT/40.%20Sm%C4%9Brovost%20a%20zisk%20ant%C3%A9n%20(2).pdf)
- [4] Dvorský, Marek. Základy bezdrátových komunikací II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO, 2014, [cit. 2019-03-10].
- [5] MACOUN, Jindra. Směrovost a zisk antén(1) [online]. In: . [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [http://www.crk.cz/FILES/VR-ANT/39.%20Sm%C4%9Brovost%20a%20zisk%20ant%C3%A9n%20\(1\).pdf](http://www.crk.cz/FILES/VR-ANT/39.%20Sm%C4%9Brovost%20a%20zisk%20ant%C3%A9n%20(1).pdf)
- [6] Angle of Radiation. Iw5edi [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.iw5edi.com/ham-radio/2474/antenna-performance-angle-radiation>
- [7] Bandwidth. Wikipedia [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_\(signal_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth_(signal_processing))
- [8] Antenna Polarization: What's It All About?. Engineering Hub [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.l-com.com/blog/post/2015/12/10/Antenna-Polarization-What%E2%80%99s-It-All-About.aspx>
- [9] Antenna – Theory, S-parameters, c2008-2015, [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné na: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>
- [10] Microstrip (Patch) Antennas. Antenna-theory [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php>.
- [11] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/01.2019-1 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. In: Český telekomunikační úřad [online]. Praha, 2019 [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/01.2019-1/obrazky/vo-r10-012019-1.pdf>
- [12] LoraWan Specification. In: LoRa Alliance [online]. 2017 [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf
- [13] IC880A-SPI - LoRaWAN Concentrator 868 MHz datasheet [online]. In: . [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: https://shop.imst.de/media/pdf/22/67/a8/iC880A_Datasheet_V0_50.pdf

- [14] Datasheet antény 2J300M. In: SOS electronic [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://cdn.sos.sk/productdata/8b/8e/2436f4aa/2j300m-300rg174-c04n.pdf>
- [15] Datasheet antény 2JP0104P. 2j-antennae [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://www.2j-antennae.com/images/products/2JP0104P.pdf>
- [16] Datasheet antény ANT-868-SP. In: MOUSER electronics [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/238/ANT-868-SP_Data_Sheet-17471.pdf
- [17] Datasheet antény 2JP0115P. 2j-antennae [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://www.2j-antennasusa.com/media/original/datasheets/2jp0115p.pdf>
- [18] Datasheet antény 2J200GP. In: SOS electronic [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://cdn.sos.sk/productdata/52/6f/bd09a7a7/2j200gp-868mhz-250rg58-c91n-2j200gp-868mhz-250rg58-c91n.pdf>
- [19] Datasheet antény 0868AT43A0020. In: MOUSER electronics [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/611/0868AT43A0020-242305.pdf>
- [20] Datasheet antény PL-6115B-868. In: Paoli [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://www.paoli.cz/out/media/PL-6115B-868%20sigfox%20lora.pdf>
- [21] Datasheet antény 2JE05. In: SOS electronic [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://cdn.sos.sk/productdata/31/7a/2e607d71/2je05.pdf>
- [22] Datasheet antény ILA.02. In: MOUSER electronics [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/398/ILA.02-1219663.pdf>
- [23] CHMIEL, Michal. Návrh meandrové antény pro RFID [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/128494>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

8 Zoznam príloh

Příloha A:	Meranie zisku	I
Příloha B:	Technický náčrt modelu č. 1 a modelu č. 2	II
Příloha C:	Graf parametru S11 pre model č. 1a, 1b	III
Příloha D:	Graf parametru PSV pre model č. 1a, 1b	IV
Příloha E:	Graf parametru S11 pre model č. 2a, 2b	V
Příloha F:	Graf parametru PSV pre model č. 2a, 2b	VI
Příloha G:	Meranie parametru S11 a PSV	VII

Súčasťou BP je CD.

Adresárová štruktúra priloženého CD:

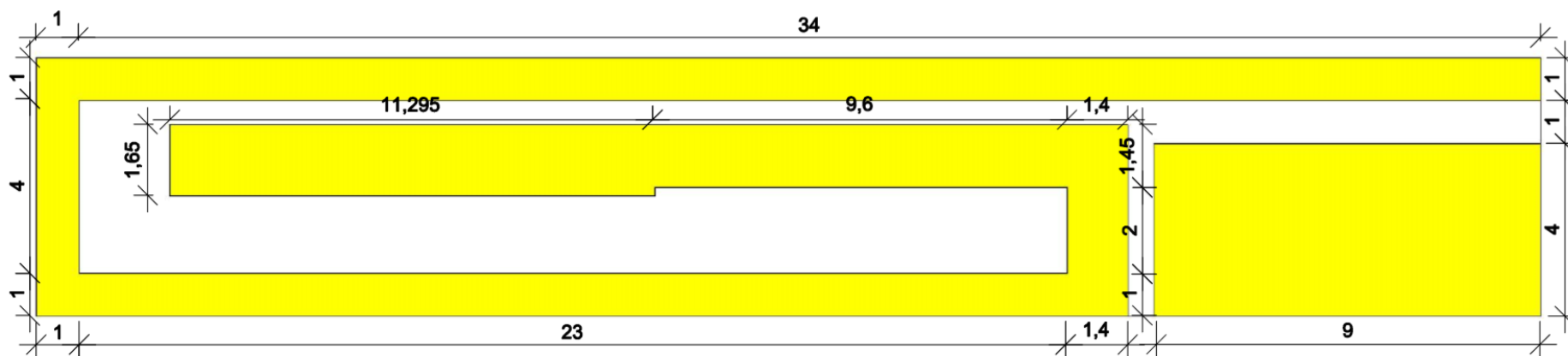
"CD-ROM":\Model1-Simulacia

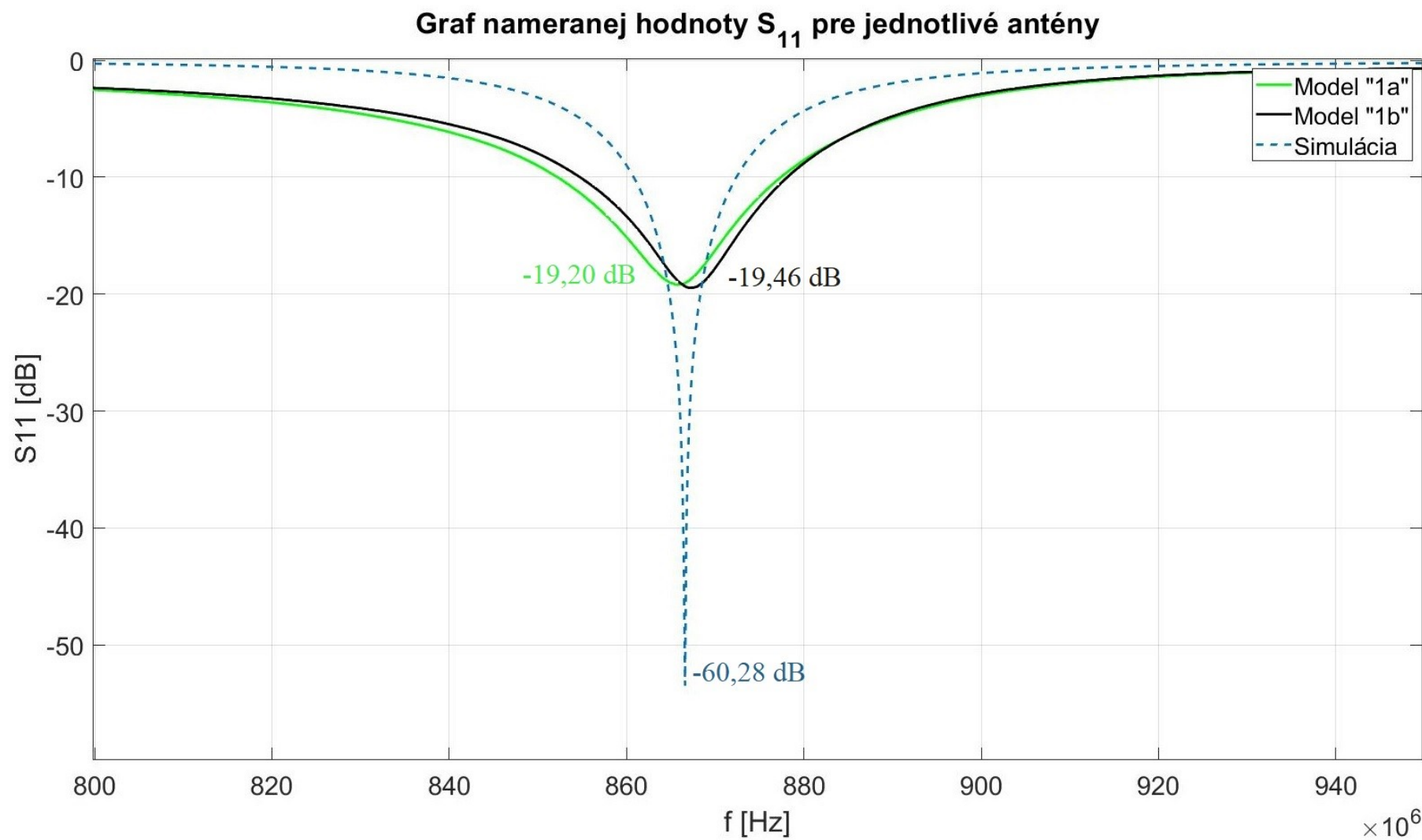
"CD-ROM":\Model2-Simulacia

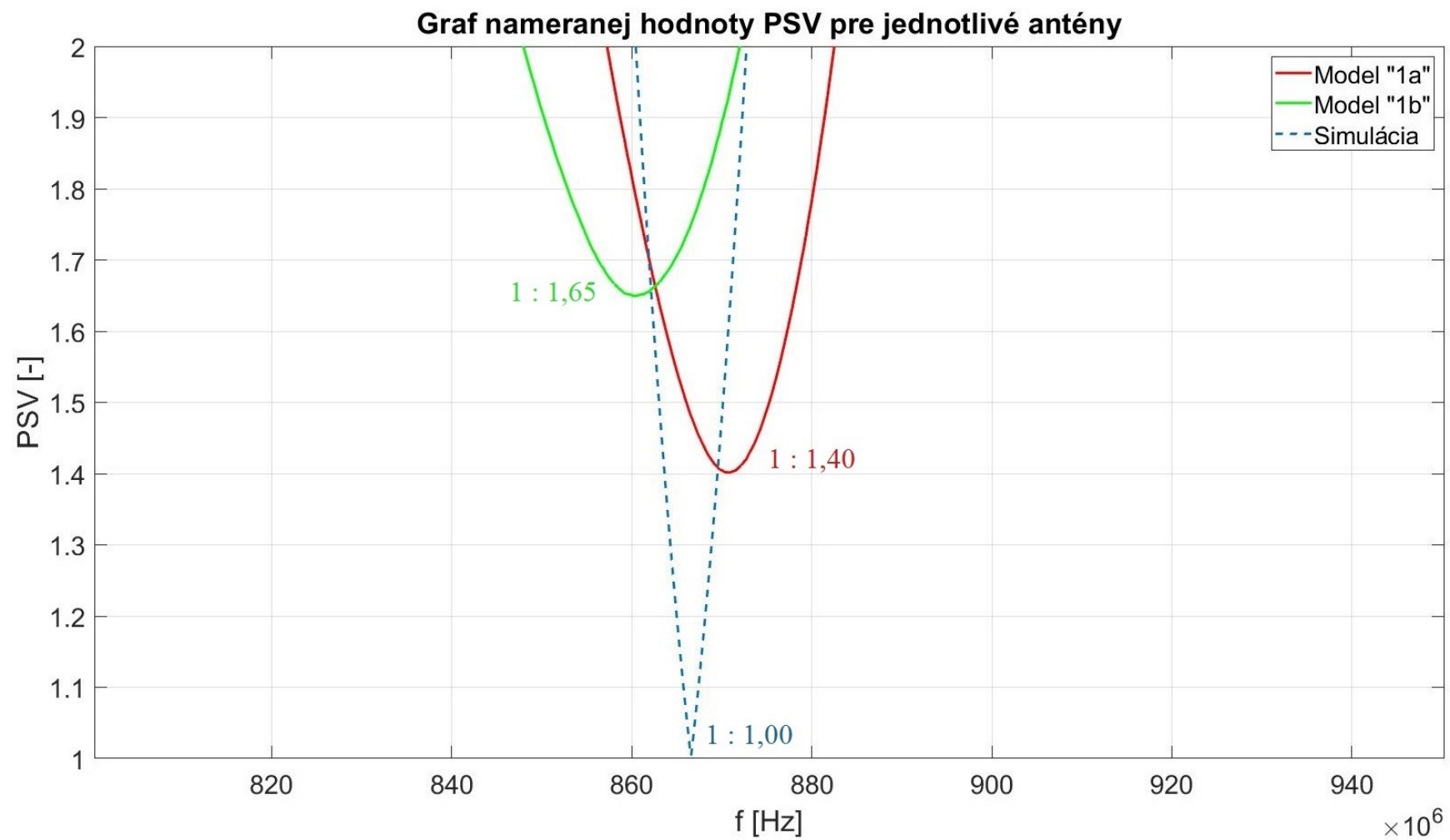
"CD-ROM":\Fotodokumentacia

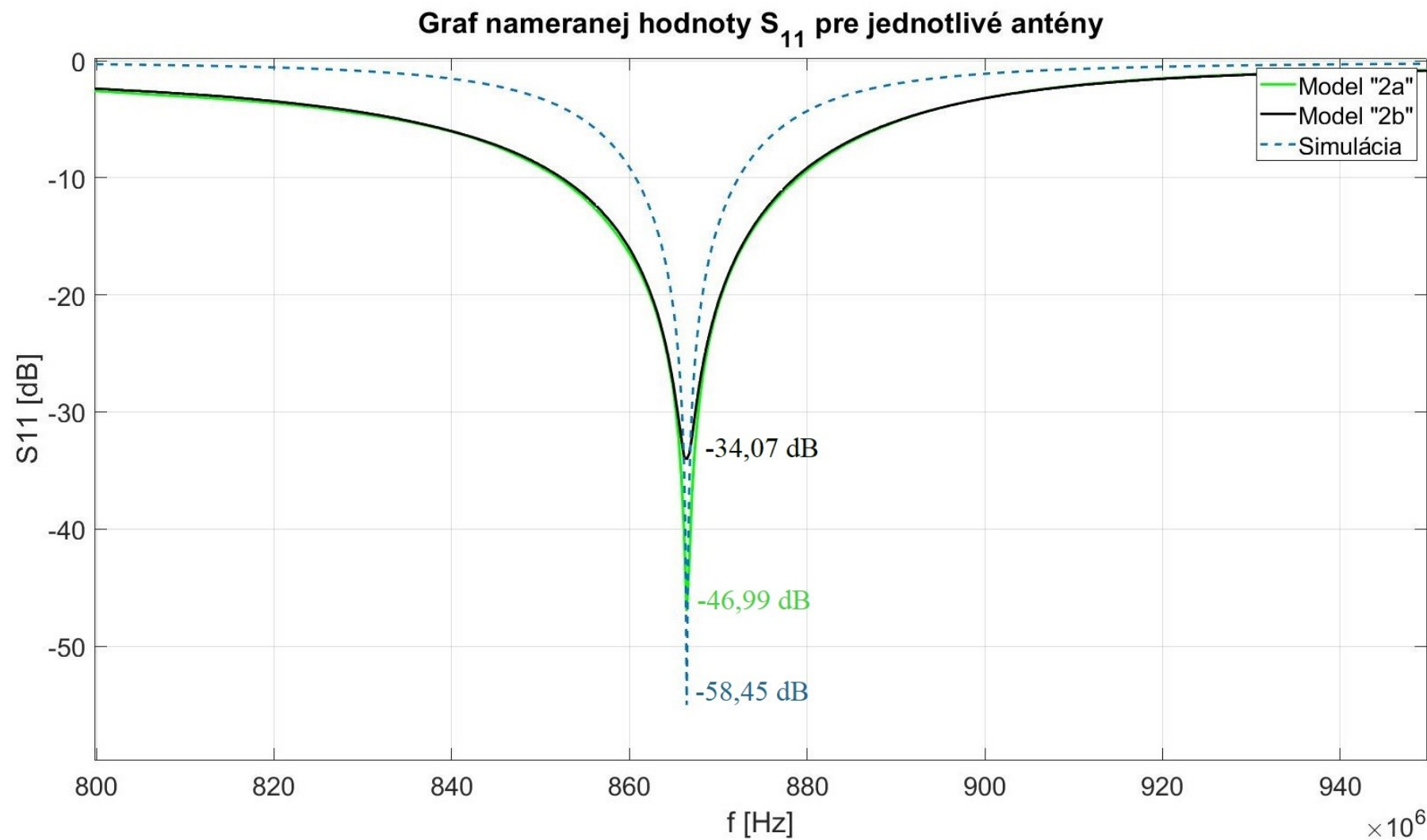
Príloha A: *Meranie zisku*

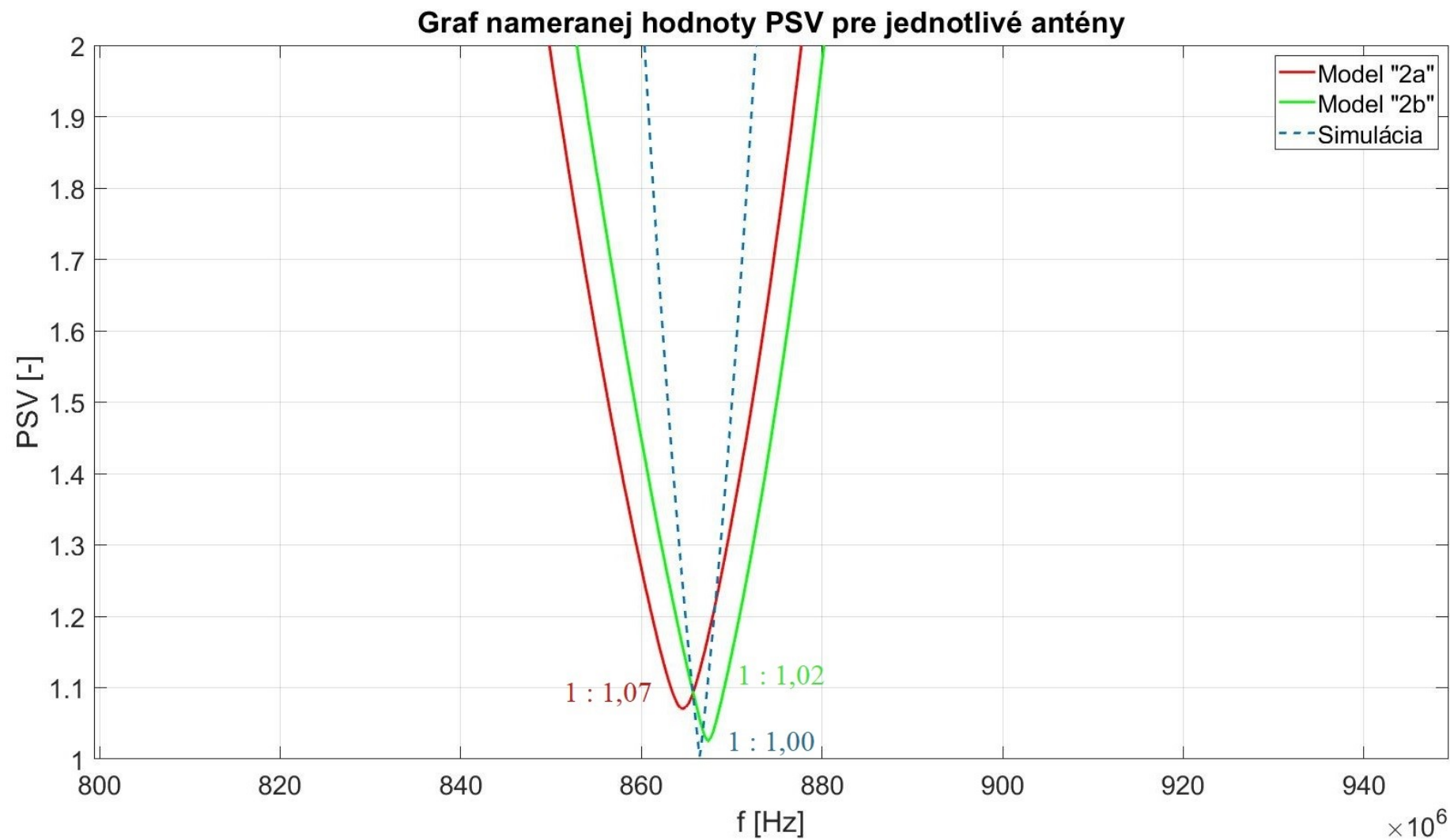












Příloha G: *Meranie parametru S_{11} a PSV*

